HIDROLOGÍA APLICADA EN LA GESTIÓN HÍDRICA

SERIE GESTIÓN HÍDRICA - VOLUMEN 1

Directores:
Sergio Marinelli - Rubén Villodas



IRRIGACIÓN
Agua que da vida

IRRIGACIÓN
edita

HIDROLOGÍA APLICADA EN LA GESTIÓN HÍDRICA

SERIE GESTIÓN HÍDRICA - VOLUMEN 1

Directores:
Sergio Marinelli
Rubén Villodas

Mendoza, 2026

IRRIGACIÓN
Agua que da vida

Hidrología aplicada en la gestión hídrica / Ángel Rubén Villodas ... [et al.] ;
Compilación de Sergio Leandro Marinelli ; Ángel Rubén Villodas ;
Prefacio de Sergio Leandro Marinelli ;
Prólogo de Jorge Maza. - 1a ed. compendiada. - Mendoza : Irrigación Edita, 2026.

390 p. ; 29 x 21 cm. - (Gestión hídrica ; 1)

ISBN 978-987-23642-8-1

1. Hidrología. 2. Medición Hidrológica. 3. Hidráulica. I. Villodas, Ángel Rubén II. Marinelli, Sergio Leandro, comp. III. Villodas, Ángel Rubén, comp. IV. Marinelli, Sergio Leandro, pref. V. Maza, Jorge, prolog.

CDD 354.36

Prefacio: Ing. Agrim. Sergio Leandro Marinelli
Prólogo: Ing. Jorge A. Maza

Autores:
Rubén Villodas
Juan A. Rivera
Ignasi Servià Goixart
Rodrigo Villarreal
Carlos Martini
Ezequiel Toum
Héctor Abel Segal
Mauricio Pinto
M. Marcela Andino
Matías Roselló
Marcelo Alejandro Toledo

ISBN: 978-987-23642-8-1

Preedición: Gabriela Ormeño y Sergio Terrera
Diseño gráfico: Mauricio Chaar

Copyright © 2026
Departamento General de Irrigación
Correo electrónico: irrigacionedita@gmail.com
1a edición: 100 ejemplares

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723
El contenido de los artículos que aparecen en este libro es responsabilidad de sus autores.
Permitida la reproducción total o parcial citando la fuente.
Impreso en Argentina | Printed in Argentina

IRRIGACIÓN
Agua que da vida

IRRIGACIÓN
edita

ÍNDICE

PREFACIO
Ing. Agrim. Sergio Leandro Marinelli — 7

PRÓLOGO
Ing. Civil Jorge A. Maza — 9

1. **GESTIÓN DE LA SEQUÍA: ÍNDICES CLIMÁTICOS**
Ing. Esp. Rubén Villodas — 11

2 **CAMBIO CLIMÁTICO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA EN MENDOZA**
Dr. Juan A. Rivera — 57

3 **DIGITALIZACIÓN Y DATOS ABIERTOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ESCENARIO DE CRISIS CLIMÁTICA**
Ing. Mtr. Ignasi Servià Goixart — 75

4 **MEDICIÓN DE LA NIEVE EN MENDOZA**
Ing. Rodrigo Villarreal — 93

5 **GESTIÓN DE PROYECTOS Y EL DISEÑO HIDROLÓGICO**
Ing. Esp. Rubén Villodas - Ing. Carlos Martini — 131

6 **MODELOS HIDROLÓGICOS EN LOS ANDES CENTRALES DE ARGENTINA Y CHILE**
Dr. Ing. Ezequiel Toum — 165

7 **PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA ALTA CUENCA DEL RÍO ATUEL**
Héctor Abel Segal — 197

8 **LA LÍNEA DE RIBERA: FUNDAMENTOS TÉCNICO-JURÍDICOS PARA LA GESTIÓN HÍDRICA**
Ing. Esp. Rubén Villodas - Dr. Mauricio Pinto — 219

9 **EL AFORO DE LOS DERECHOS DE AGUA: PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE VOLÚMENES**
Dr. Mauricio Pinto - Ing. Esp. Rubén Villodas - Dra. M. Marcela Andino — 273

10 **DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN CONTEXTO DE SEQUÍA**
Ing. Matías Roselló — 311

11 **GESTIÓN DE INUNDACIONES**
M.Sc. Ing. Marcelo Alejandro Toledo — 359

PREFACIO

La provincia de Mendoza atraviesa el desafío hidrológico más complejo de su historia moderna, enfrentando una importante sequía, iniciada en 2010, que ha dejado de ser un evento pasajero para consolidarse como una "nueva normalidad" climática. En este contexto, los procesos hidrológicos ya no pueden ser entendidos como fenómenos estacionarios donde los valores de lluvias y caudales se mantienen constantes en el tiempo; por el contrario, la realidad nos demuestra que el ciclo hidrológico es esencialmente cambiante y requiere de una gobernanza proactiva que reemplace las herramientas obsoletas del siglo pasado por un enfoque basado en el diseño adaptativo y la gestión del riesgo.

Esta obra, primer tomo de la Serie Gestión Hídrica del sello Irrigación Edita, nace con el propósito estratégico de cerrar la brecha entre el conocimiento científico de vanguardia y la toma de decisiones. El libro aborda la fragmentación del conocimiento donde históricamente la técnica hidrológica y el marco jurídico han avanzado por carriles separados; aquí se presentan de forma integrada como una herramienta indispensable para autoridades hídricas, tomadores de decisiones gubernamentales y profesionales de la ingeniería y el derecho que enfrentan la escasez diaria. Para ello, el material ha sido organizado en un recorrido lógico que guía al lector desde el origen del recurso en las altas cumbres hasta su gestión efectiva en la red de distribución.

Inicialmente, en la obra se abordan los fundamentos climáticos y de riesgo, analizando cómo el cambio climático ha alterado la disponibilidad de agua y exigiendo una transición desde el manejo reactivo de crisis hacia el uso de índices climáticos estandarizados. Estos indicadores funcionan como disparadores normativos que permiten objetivar la severidad de la sequía y activar respuestas institucionales transparentes mediante la digitalización

y el uso de datos abiertos. Esta base científica es lo que permite vincular la amenaza climática con la vulnerabilidad social y los niveles de riesgo aceptables para la comunidad.
Avanzando hacia la fuente del recurso, se profundiza en la medición y la modelación, partiendo de la premisa de que en Mendoza más del 95% del agua depende de la nieve. Se detalla el funcionamiento del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) y el uso de modelos de base física que permiten transformar los datos de nieve acumulada en predicciones precisas de escurrimiento. Este conocimiento técnico de las cuencas es vital para planificar actividades económicas y diseñar estrategias ambientales y sociales en un territorio cuya supervivencia depende del deshielo cordillerano.
Posteriormente se vincula la hidrología al diseño de proyecto de obras y al marco legal del agua, abordando dos pilares de la seguridad jurídica: el aforo y la línea de ribera. El aforo no solo como medición física, sino que se presenta al aforo legal como una herramienta que determina el volumen que corresponde a cada usuario; mientras que la línea de ribera establece el límite técnico-legal entre el dominio público hidráulico y la propiedad privada. Esta interrelación entre la hidrología y el derecho garantiza la paz social y la estabilidad de las concesiones en un escenario de recursos decrecientes.
Finalmente, el libro aterriza en la gestión operativa y de inundaciones, traduciendo la teoría en herramientas de control volumétrico como la "Cuenta de Agua" y el software SIDIS. Estas soluciones permiten una distribución más flexible y eficiente durante la sequía, al tiempo que se abordan los riesgos de inundación mediante infraestructuras resilientes y planes de monitoreo modernos.
Los autores, especialistas del Departamento General de Irrigación, y otros profesionales e investigadores de renombre invitados a participar en esta obra colectiva, confían en que estas páginas se conviertan en la referencia técnica y bibliográfica indispensable para construir un modelo de gestión hídrica sustentable en el siglo XXI.

Ing. Agrim. Sergio Leandro Marinelli
Superintendente General de Irrigación

PRÓLOGO

Cuando el Ing. Esp. Rubén Villodas me encargó la redacción del presente prólogo me sentí distinguido por quien fuera mi primer becario de investigación hace 36 años en el Instituto Nacional del Agua y cuya excelente trayectoria profesional he seguido, y en algunas ocasiones compartido. Me siento orgulloso de haber participado de alguna manera en la formación de su exitosa carrera profesional.

En un contexto global atravesado por la incertidumbre climática y la creciente presión sobre los recursos naturales, la gestión del agua ha dejado de ser una cuestión meramente técnica para convertirse en un eje estratégico del desarrollo sostenible.

La obra, dirigida por el Superintendente Ing. Agrim. Sergio Marinelli y el Ing. Esp. Rubén Villodas, se inscribe con solvencia en este nuevo paradigma, ofreciendo no solo un compendio técnico de herramientas ingenieriles y socioeconómicas, sino una propuesta integral de transformación en la manera de comprender y gestionar el recurso en un área donde, como es Mendoza, abunda la aridez. Debido a la interdisciplinaridad confluyente en el objetivo de la obra, en la cual se han seleccionado los autores de los distintos capítulos con un acertado criterio, reflejado en la experticia de cada uno de ellos.

A lo largo de sus capítulos, se relaciona la hidrología como ciencia y la gestión pública como responsabilidad institucional, tal como le cabe al Departamento General de Irrigación de la Provincia de Mendoza. Desde el concepto de sequía, diferenciando entre escasez hídrica y déficit hídrico, hasta la formulación operativa de un plan de gestión del riesgo de sequía, el texto conduce a convertir el conocimiento en acción.

La provincia de Mendoza, con su fuerte dependencia de la precipitación nival de alta montaña, constituye un escenario donde el pronóstico es una necesidad obvia. En este marco, la estandarización de varios índices explicados, se convierte en una herramienta clave para la gestión del recurso. Estos indicadores, permiten prever la crisis y consecuentemente proponer una gestión preventiva.

El valor de esta obra reside también en su capacidad de integrar metodologías internacionales con la realidad climática e hidrológica específica de la región cuyana. Da cuenta de ello la confección de modelos de simulación del funcionamiento físico de las cuencas termo nivales alineados con los estándares técnicos globales.

No solamente tiene en cuenta la disponibilidad del recurso hídrico, sino que también trata el tema de las inundaciones producidas por las intensas tormentas convectivas estivales cuyo escurrimiento circula por cauces de características aluvionales y los escurrimientos fluviales al tratar el difícil aspecto del trazado de líneas de ribera para deslindar lo público de lo privado.

Más allá de la visión ingenieril, este libro expresa claramente que la gestión del agua debe sustentarse en transparencia, participación y legitimidad técnica, convergiendo hacia el bienestar social y productivo.

Esta obra es una referencia para ingenieros, planificadores y responsables de políticas públicas que trabajan administrando sistemas complejos con incertidumbres. Seguramente también será un libro de consulta en la formación de profesionales universitarios.

Que este libro sirva no solo como guía técnica, sino también para incentivar a concientizar sobre la existencia del riesgo y de la necesidad de gestionarlo. El conocimiento de los procesos hidrológicos expresado en índices de clara y sencilla interpretación y las decisiones consecuentes, producirán una resiliencia en las cuencas que permitirán que las comunidades que viven en ellas visualicen un futuro próspero.

En conclusión, en este libro se deja un claro mensaje: anticipar es mejorar la gestión.

Ing. Civil Jorge A. Maza

1 GESTIÓN DE LA SEQUÍA: ÍNDICES CLIMÁTICOS

Ing. Esp. Rubén Villodas[1]

1.1 RESUMEN

La gestión moderna de los recursos hídricos exige una transición definitiva del paradigma reactivo de manejo de crisis hacia un enfoque proactivo de gestión integral del riesgo, materializado en el Plan Especial de Gestión del Riesgo de Sequía (PEGRIS) de la Provincia de Mendoza.

Este marco estratégico utiliza la hidrología como base científica para caracterizar la variabilidad natural del ciclo del agua y transformarla en información operativa mediante el uso de índices climáticos estandarizados, los cuales normalizan las anomalías hídricas para permitir comparaciones objetivas entre regiones y períodos históricos.

El núcleo técnico de esta propuesta reside en el desarrollo de un Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana (SMAT) que integra indicadores específicamente adaptados a la realidad regional, donde más del 95% del recurso hídrico depende de la precipitación nival en alta montaña. Se destacan herramientas como el Índice de Nieve Estándar (INE) para la vigilancia meteorológica anual, y los índices de Derrame (IDE) y Caudales (ICE) para el seguimiento hidrológico, todos armonizados bajo la rigurosidad estadística del Índice de Precipitación Estándar (SPI) recomendado por la Organización Meteorológica Mundial.

Estos indicadores funcionan como "disparadores" normativos que activan fases de ges-

1 Ingeniero Civil, Especialista en Ingeniería Ambiental, Director de Gestión Hídrica del Departamento General de Irrigación y Profesor Titular de Hidrología e Hidrología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

tión, de gravedad progresiva, permitiendo una respuesta escalonada que prioriza el abastecimiento humano y la resiliencia productiva ante la escasez, déficit o sequía, de acuerdo a la severidad de la falta de agua.

A través de los Planes de Acción por Cuenca (PAGRIS), el SMAT traduce la complejidad técnica de las reservas en embalses (IRE) y la oferta hídrica integrada (IOAS) en señales de comunicación transparentes, garantizando una gobernanza del agua sostenible, participativa y estrictamente basada en el conocimiento del riesgo hídrico.

1.2 INTRODUCCIÓN

La hidrología aporta la base científica y operativa que permite a los gestores de recursos hídricos anticipar, evaluar y mitigar las sequías.

Mediante mediciones continuas de la precipitación, la escorrentía, las reservas en embalses y acuíferos, y la evapotranspiración, los hidrólogos reconstruyen el ciclo hidrológico de cada cuenca, generan series históricas y alimentan modelos que permiten conocer la disponibilidad de agua y su variabilidad temporal y areal.

Estos datos respaldan la evaluación del peligro (frecuencia e intensidad de la falta de agua), de la exposición (sectores de la población y territorios afectados) y de la vulnerabilidad (capacidad de los usuarios para soportar la escasez), tres pilares en la gestión del riesgo de sequía.

También sustentan los sistemas de alerta temprana, en los que la información hidrometeorológica se utiliza para proyectar caudales, niveles de embalses y humedad del suelo semanas o meses por delante y activar medidas de mitigación con tiempo.

Traducir las observaciones y proyecciones hidrológicas en decisiones de gestión exige índices climáticos que transforman series de datos en valores normalizados que reflejan la anomalía respecto a las condiciones climáticas habituales; así permiten comparar la gravedad y duración de las sequías entre regiones y para distintas escalas temporales.

No existe un único índice válido para todos los climas y sectores, por lo que es recomendable adoptar un enfoque con varios indicadores o índices, para captar los distintos tipos de sequía y sus efectos.

Los índices son elementos desencadenantes dentro de los planes de sequía: los valores umbral de un índice, determinan el momento en que deben activarse o desactivarse diferentes niveles de alerta y las correspondientes medidas de gestión.

Por esto es esencial tener un conjunto de índices armonizado con un plan de acción, de manera que, al superar un umbral, se desencadenen automáticamente medidas de reducción de demanda, movilización de recursos o protección de ecosistemas.

En resumen, la hidrología suministra los datos y modelos que permiten conocer y prever la disponibilidad de agua, mientras que los índices climáticos convierten esa información en señales cuantificadas y comprensibles que activan los planes de contingencia.

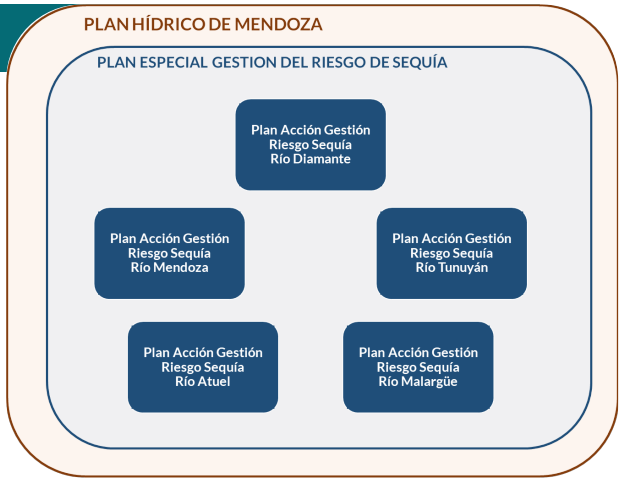
Esta combinación de observación y modelación hidrológica, por una parte; y la utilización estratégica de índices climáticos como desencadenantes normativos, por otra; es la que permite pasar de una gestión reactiva, basada en crisis, a una gestión proactiva del riesgo de sequía, lo que deriva en el desarrollo, por parte del Departamento General de Irrigación (DGI) del **Plan Especial de Gestión de Riesgos de Sequías (PEGRIS)** de la Provincia de Mendoza.

1.3 PLAN ESPECIAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA (PEGRIS)

Este plan es un instrumento estratégico, integrado en el Plan Hídrico provincial, que establece los lineamientos obligatorios y recomendaciones técnicas para una gestión preventiva y proactiva del riesgo de sequía. Su enfoque principal es cambiar el paradigma tradicional de "gestión de crisis" (reactivo) hacia un modelo de "gestión del riesgo".
El PEGRIS se pone en operación a través de los Planes de Acción para la Gestión del Riesgo de Sequía (PAGRIS), específicos para las cuencas de los ríos Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel y Malargüe. Las Subdelegaciones y las Inspecciones de Cauce son las responsables directas de elaborar y ejecutar estos planes en sus jurisdicciones.
El objetivo general del PEGRIS es crear un marco de lineamientos para la elaboración e implementación de los PAGRIS con la finalidad de minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales de eventuales situaciones de sequía que afectan el desarrollo sostenible de cada cuenca (ver Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1

Esquema normativo del PEGRIS



Fuente: Elaboración propia

Este objetivo general se persigue a través de los siguientes objetivos específicos:

a. Garantizar la disponibilidad de agua requerida para asegurar la salud y la vida de la población, minimizando los efectos negativos sobre el abastecimiento urbano;
b. Minimizar los efectos negativos sobre las actividades económicas, según la priorización de usos establecidos en la legislación de aguas y en el Plan Hídrico Provincial.

A su vez, para alcanzar los objetivos específicos se plantean los siguientes objetivos operativos:

a. Definir mecanismos para la previsión y detección de situaciones de sequía;
b. Fijar umbrales para la determinación de las situaciones de sequía (fases de gravedad progresiva);
c. Definir las medidas para conseguir los objetivos específicos en cada fase de las situaciones de sequía;
d. Asegurar la transparencia y participación pública en el desarrollo de los PAGRIS;
e. Armonizar la gestión provincial del riesgo de sequía con la Ley 27.287 (SINAGIR) y su Decreto Reglamentario, integrando los Ejes del Plan de Acción SISSA;
f. Adoptar un enfoque combinado con metodologías internacionales: DRRA (Banco Mundial) y Planes Especiales de Sequía europeos;
g. Establecer un marco común de indicadores, umbrales y procedimientos para anticipar, mitigar y responder a eventos de sequía;
h. Reducir la vulnerabilidad de los sistemas de riego, proteger el abastecimiento humano y preservar los ecosistemas hídricos;
i. Definir el contenido mínimo y la lógica de implementación que deberán seguir todos los PAGRIS de cuenca.

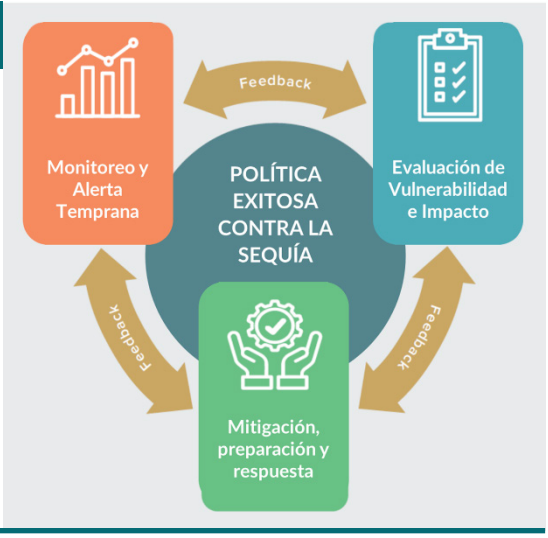
Este plan de acción se construye sobre tres pilares, o ejes, fundamentales (Cuadro 1.2) para la resiliencia hídrica:

Sist. de Monitoreo y Alerta Temprana	implementado de forma centralizada por el DGI, utiliza indicadores e índices que funcionan como "disparadores" para activar medidas según fases de gravedad progresiva de la sequía;
Evaluación de Vulnerabilidad	identifica grupos interesados y comisiones técnicas para analizar cuán susceptibles son las comunidades y los sistemas de riego, evaluando su capacidad de respuesta;

Medidas de Mitigación	define acciones estructurales (obras, modernización) y no estructurales (gestión de demanda, seguros) que se aplican de forma escalonada según la gravedad de la situación.

Cuadro 1.2

PAGRIS – Esquema general



Fuente:

Adaptación de Cap-Net UNDP, 2020, Figure 1.9, IDMP

En primer lugar, la consolidación del Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana (SMAT) será implementado en forma centralizada por el Departamento General de Irrigación (DGI) para todas las cuencas de la provincia, a través una serie de indicadores e índices que servirán como disparadores de las acciones a realizar, de acuerdo con los riesgos y respuestas establecidas en cada uno de los PAGRIS.

El segundo eje corresponde a la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de sequías. Por su abordaje complejo e integral, el DGI ha de identificar, en cada cuenca, los grupos de los diversos interesados de la comunidad y las comisiones técnicas, relacionadas con estos componentes, como los espacios propicios para llevar adelante las acciones necesarias. Aquí, se prevé, se promoverán los mecanismos para la evaluación de las diversas presiones sobre las comunidades expuestas a sequías y se determinará cuán susceptibles son frente a este tipo de eventos y qué capacidad de respuesta tienen.

Por último, el tercer eje busca identificar las medidas que deberán ser implementadas en forma escalonada, de acuerdo a la gravedad de la situación de sequía, en cada cuenca, para mitigar sus impactos y mejorar la respuesta, por un lado, así como identificar las instituciones públicas o privadas responsables de llevarlas a cabo.

Los tres ejes y sus componentes son la base sobre la cual se establece el PAGRIS, y proporcionan una forma práctica de definir mecanismos que determinen los criterios, guías, protocolos o instrumentos que se identifiquen apropiados para la implementación del plan a nivel de cuencas y subcuencas, y de todas las acciones y actividades necesarias para la prevención, preparación y respuesta frente a los eventos de sequía, de una manera eficiente y coordinada por el DGI.

1.4 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SEQUÍA

1.4.1 Introducción

La sequía es un componente normal y recurrente del clima, aunque su extensión geográfica y su gravedad variarán a escala estacional o anual. Históricamente se ha tendido a considerarla como un evento inesperado y excepcional, cuando en realidad es una anomalía temporal dentro de la variabilidad natural.

Se la debe considerar como un estado relativo y no absoluto. Se manifiesta tanto en regiones muy lluviosas como poco lluviosas y prácticamente en todos los regímenes climáticos. Los científicos, los responsables de políticas y el público suelen asociarla únicamente a regiones áridas, semiáridas y subhúmedas pero, en realidad, el fenómeno de la sequía ocurre en la mayoría de los países, tanto en regiones secas como húmedas.

Como primera medida conviene distinguir la aridez de la sequía: la aridez es un rasgo climático de largo plazo y refleja una falta de precipitaciones permanente, mientras que la sequía es un fenómeno temporal asociado a desviaciones negativas transitorias de la precipitación normal (Cuadro 1.3**).**

Un clima árido se caracteriza por una disponibilidad permanente de agua muy baja en relación con la demanda evaporativa. De forma simple, sin entrar en cálculos más complejos, es común considerar árido un clima donde la precipitación anual es muy inferior a la evapotranspiración potencial y suele estar por debajo de 250 ó 300 mm/año, condición que implica que la evapotranspiración excede con creces el aporte de humedad.

Las sequías son generalmente el resultado de la combinación de varios factores naturales; variables que a su vez pueden verse influenciados por las actividades humanas. La causa principal de cualquier sequía es la falta de precipitaciones y, en particular la periodicidad, distribución e intensidad de esta carencia respecto al uso, demanda y almacenamiento de agua.

Esto último lleva también a distinguir entre periodos de escasez de agua respecto de sus características climáticas históricas, por un lado, y períodos de déficit hídricos, generados por la demanda de este recurso.

1.4.2 Definiciones

Un factor que diferencia la sequía de otros fenómenos naturales peligrosos, es la ausencia de una definición precisa y universalmente aceptada de la misma. Hay centenares de definiciones y eso aumenta aún más la confusión en torno a la realidad, o no, de una sequía y de su gravedad.

Cuadro 1.3 Conceptos generales de la sequía
Contexto y procesos



Fuente: Adaptación de Ortega-Gaucin (2025, Aqua-LAC)

Las definiciones de este fenómeno deben responder a las características de la región o al tipo de efectos que éste produce, puesto que las sequías son regionales y cada región presenta características climáticas específicas.

La palabra "sequía" insinúa significados diferentes para los hidrólogos, o para los gestores hídricos, o a los productores agrícolas, o los responsables de centrales hidroeléctricas o para los biólogos naturalistas. Es más, incluso en cada sector la sequía se entiende desde perspectivas diferentes ya que sus efectos pueden ser muy distintos.

Por lo tanto, es fundamental establecer dos conceptos básicos para comprender los distintos significados que se le ha dado a la "sequía", siendo éstos:

Escasez hídrica — se refiere a los períodos en que el recurso hídrico (el caudal de un río, el equivalente agua nieve (EAN) de una estación, etc.) es inferior al promedio histórico. Por tanto, la escasez es, fundamentalmente, un "evento natural".

Déficit hídrico — se entiende al déficit hídrico, como aquella situación en la que los recursos hídricos disponibles no alcanzan para satisfacer una demanda. Como se tiene en cuenta la demanda del recurso hídrico para distintos usos, el déficit es un fenómeno típicamente "antrópico".

Teniendo presentes estos dos conceptos, a modo de ejemplo se presentan varias definiciones dadas por distintos organismos técnicos, científicos y políticos alrededor del mundo:

- √ "La sequía es una anomalía transitoria que se caracteriza por la escasez temporal de agua, en comparación con el suministro normal, en un período de tiempo dado (una estación, un año, o varios años)." Fuente: Organización Iberoamericana iAgua.
- √ "La sequía corresponde a una situación de déficit hídrico suficiente para perjudicar, en mayor o menor grado, a la vegetación, los animales o el hombre. Una sequía involucra, tácita o explícitamente, un perjuicio económico o social." Fuente: Plan Nacional de Sequía del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- √ "Las sequías son aquellos períodos de tiempo en los que ocurren anormalmente condiciones meteorológicas más secas, las cuales son lo suficientemente prolongadas como para que la falta de precipitación produzca un grave desequilibrio hidrológico." Fuente: Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992).
- √ "Sequía significa el fenómeno natural que existe cuando la precipitación ha sido significativamente inferior a los niveles normales registrados, causando graves desequilibrios hidrológicos que afectan negativamente a los sistemas de producción de recursos de la tierra." Fuente: Convención Combatir la Sequía de las Naciones Unidas (1994).
- √ "Es el porcentaje de años en que los cultivos fallan por falta de humedad." Fuente: Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1983).
- √ La sequía es un fenómeno natural complejo que afecta a todos los climas y comporta impactos socioeconómicos, cuyo alcance varía según distintos factores y condiciones. La agricultura es el primer sector, y el más afectado, por la sequía (FAO, 2026).
- √ Debe entenderse como la falta de disponibilidad de recursos que puedan cubrir las demandas de agua con la garantía mínima que fija el Plan Hidrológico (Junta de Andalucía, España, 2026).

Es por esta variedad de factores involucrados en la definición, es que se reconoce que no existe "la sequía" y mundialmente se ha adoptado el criterio de hablar de cuatro tipos de sequías: la meteorológica, la hidrológica, la agronómica y la socioeconómica.

1.4.3 Tipos de sequía

Los tipos de sequías son:

Meteorológica	Basada en datos climáticos, representa la desviación de las precipitaciones, lluvias o nieve, respecto a la media durante un período de tiempo determinado, válidas para diferentes áreas geográficas.
Hidrológica	Hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de agua superficial o subterránea (ríos, embalses, lagos, acuíferos, etc.). Al producirse un desfase entre la escasez de lluvias o nieves y la reducción del caudal de ríos o el nivel de lagos y embalses o el descenso de niveles en acuíferos, las mediciones hidrológicas no suelen ser utilizadas como un indicador del inicio de la sequía, pero sí de su intensidad.
Agrícola	Se estima no solo a partir de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas de los cultivos y las propiedades del suelo. Si los niveles de humedad del subsuelo son suficientes para proporcionar agua a un determinado tipo de cultivo durante el período que dure la sequía meteorológica o hidrológica, no llegará a producirse una sequía agrícola.
Socioeconómica	Se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias o nieve. No es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta que algún sector económico se vea afectado por la falta de recurso. En general, la sequía socioeconómica sucede a la sequía agrícola, y en regiones poco desarrolladas, este sector tiene un mayor peso en la economía y su incidencia es más directa e inmediata, respecto de regiones desarrolladas.

La secuencia temporal en que se producen estos cuatro tipos de sequías no es igual para todas las regiones, como ya se comentó, aunque es evidente que toda sequía se inicia por una insuficiente, o una disminución, de las precipitaciones pluviales, o nivales, por lo que la Sequía Meteorológica es la que casi siempre dispara este proceso.

Si se revisa la bibliografía mundial, es común ver que presentan una secuencia general de estos cuatro tipos de sequía como: Meteorológica - Agrícola - Hidrológica - Socioeconómica.

Las sequías agrícola, hidrológica y socioeconómica son menos frecuentes que la meteorológica ya que en esos sectores los efectos están vinculados a la disponibilidad de agua en la superficie y en el subsuelo. Normalmente, transcurren varias semanas antes de que las deficiencias de precipitación pluvial comiencen a producir un déficit de humedad en el suelo que, a su vez, afectará negativamente a los cultivos. La persistencia de un tiempo seco durante meses reduce el caudal de los ríos y el nivel de los embalses y lagos y, potencialmente, el nivel de las aguas freáticas. Cuando la sequía se prolonga sobrevienen las sequías agrícola, hidrológica y socioeconómica, con sus correspondientes efectos.

Durante una sequía no sólo disminuye la tasa de reposición hídrica en la superficie y en el subsuelo, sino que aumenta también enormemente la demanda de esos recursos. La relación entre los principales tipos de sequía y el déficit de precipitación pluvial es menos directa, debido a que la disponibilidad de agua en la superficie y en el subsuelo depende de la gestión de esos sistemas. Un cambio de gestión del abastecimiento de agua puede reducir o agravar los efectos de una sequía. Así, por ejemplo, la adopción de unas prácticas de laboreo apropiadas y la plantación de variedades de cultivo más resistentes a la falta de agua, pueden atenuar considerablemente los efectos de este fenómeno.

En contraposición y de acuerdo con: las características climáticas de nuestra región árida; al tipo de precipitación más importante (nival); las características de nuestros regímenes fluviales; a los conceptos de escasez y déficit; y a la gestión del recurso que se realiza, con un destino mayoritariamente agrícola, en este plan se han establecido los criterios generales que se esquematizan en el Cuadro 1.4.

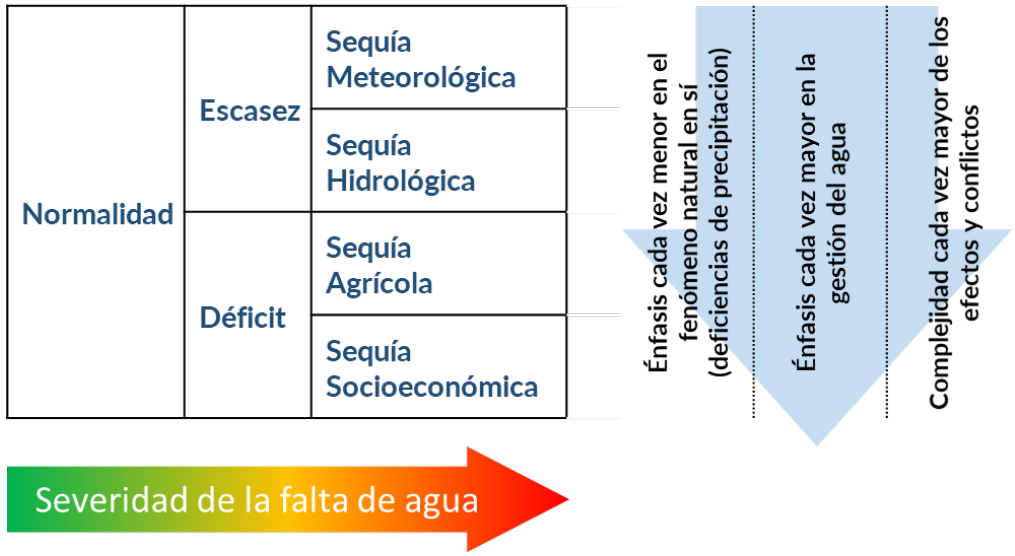
En nuestra provincia, más del 95% del recurso hídrico disponible anualmente, proviene de las precipitaciones níveas que se producen cada año en alta montaña, ya que éstas son las responsables de la permanencia de los glaciares; los escurrimientos de los ríos y arroyos; y de las infiltraciones que recargan los acuíferos.

Por lo tanto, producida una condición de escasez o de sequía de nevadas, se tiene una respuesta muy rápida en la disminución de los caudales de los cursos de agua, y una acción más lenta sobre los niveles de los acuíferos. O sea, es altamente probable que, ante la existencia de una escasez de nevadas o Sequía Meteorológica, se presente seguidamente una escasez de caudales o Sequía Hidrológica. Es importante destacar que es probable que también desciendan las reservas de los embalses, aunque éstos no sólo dependen de los ingresos por deshielo, sino que están influenciados por las erogaciones que se hacen de los mismos.

Cabe aclarar que los límites que se muestran entre los tipos de sequía son generales para la mayoría de los casos, o sea, que a una situación de escasez desencadene un estado de déficit. Aunque puede ocurrir que, que tanto la escasez y el déficit hídrico se presenten en forma independiente, ya que:

- una región puede presentar en sus ríos, caudales menores a los históricos (existe escasez) pero éstos pueden ser suficientes para atender las demandas existentes (no hay déficit),
- por el contrario, los caudales de los ríos de una región pueden ser iguales o superiores a los históricos (no hay escasez) pero siguen siendo insuficientes para satisfacer las demandas (existe déficit).

Cuadro 1.4 Interrelaciones entre los tipos de sequías



Fuente: Adaptación de Ortega-Gaucin (2025, Aqua-LAC)

1.4.4 Caracterización

Las sequías presentan tres rasgos distintivos: intensidad, duración y extensión. En función de estas características se deberán realizar gran parte de los análisis de riesgos de los PAGRIS de las cuencas provinciales.

La intensidad refleja la disminución del recurso y la gravedad de los efectos asociados a esa falta de agua. Su magnitud suele determinarse en términos de la desviación, respecto de las pautas normales, de parámetros o indicadores climáticos tales como la precipitación, el volumen anual escurrido en un río (derrame) o el nivel de los embalses, generalmente cuantificada por índices que los representan.

Otra característica esencial de las sequías es su duración. Las sequías, por lo general, tardan unos meses en hacerse patentes, lo que dificulta muchas veces la determinación del inicio de las mismas. Una vez comenzada, la sequía puede durar meses o años.

La magnitud de los efectos de una sequía está estrechamente relacionada con el momento en que comienza la escasez de precipitación y con la intensidad y duración del fenómeno.

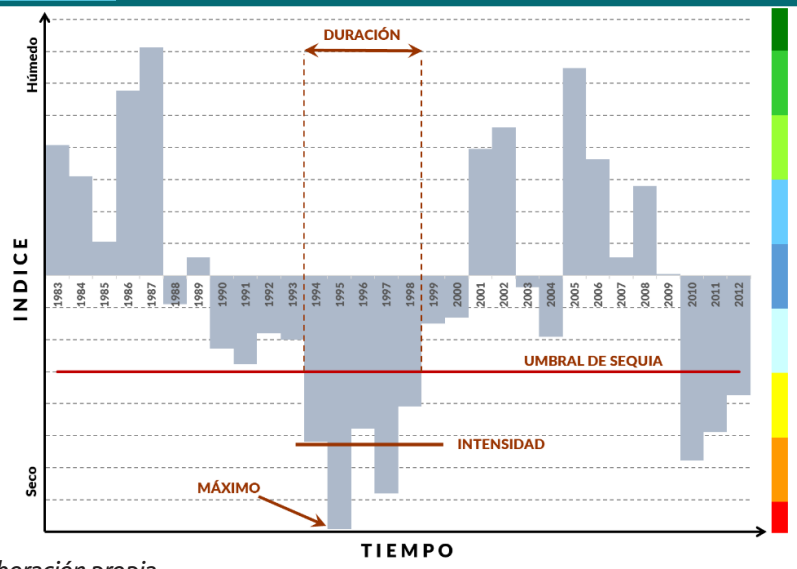
Por el contrario, las sequías meteorológicas e hidrológicas, pueden sobrevenir rápidamente en algunos regímenes climáticos como el de nuestra región, lo que permite identificarlas claramente, si se poseen los sistemas de monitoreo y alerta temprana adecuados.

Las sequías difieren también en sus características espaciales. Las áreas afectadas por sequías graves evolucionan de manera gradual y las regiones de máxima intensidad, como los epicentros, cambian de una estación a otra y de año en año cuando las sequías persisten lo suficiente.

Los episodios de sequía comienzan cuando las precipitaciones disminuyen por debajo de un umbral dado (Cuadro 1.5). Este umbral está medido por un determinado índice y se desarrolla en un proceso temporal, identificado y caracterizado por:

- √ su duración — período durante el cual el índice se encuentra por debajo del umbral seleccionado;
- √ la intensidad — promedio de valores del índice durante el período en que el mismo está por debajo del umbral seleccionado. Es usual también tomar la suma positiva de los valores inferiores al umbral;
- √ la magnitud — acumulación del déficit por debajo del umbral seleccionado durante el período de la sequía, se estima como el producto de la duración y la intensidad.

Cuadro 1.5 Caracterización de la sequía (índice, umbral, duración e intensidad)



Fuente: Elaboración propia

Es interesante destacar el código de colores que se encuentra a la derecha del Cuadro 1.5, dado que será utilizado posteriormente en la representación de distintos índices.

Dado que un evento de sequía generalmente afecta simultáneamente áreas que se extienden más allá de una única estación meteorológica o de una única cuenca, otro factor a tener en cuenta para caracterizarla es la extensión territorial del área bajo sequía.

Por último, el tiempo desde el inicio hasta que se alcanza la máxima intensidad y el tiempo entre los diferentes eventos de sequía, son también características a considerar al momento de definir las características.

1.5 SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

1.5.1 Introducción

Un sistema de indicadores, índices y alerta temprana es la base operativa que convierte un plan de sequía en un instrumento de gestión del riesgo, al articular evidencia cuantitativa, umbrales de decisión, comunicación eficaz y respuesta escalonada.

La estandarización de este conjunto de índices permite armonizar el diagnóstico y la activación de medidas entre las distintas cuencas, diferenciando con claridad una situación de escasez a la de distintos tipos de sequía, ofreciendo un lenguaje común para la toma de decisiones.

La evidencia internacional muestra que estos sistemas, cuando integran el conocimiento del riesgo, un monitoreo y análisis robustos, avisos tempranos y oportunos; y capacidades de preparación y respuesta, reducen impactos, mejoran la transparencia y fortalecen la resiliencia hidrológica y socioeconómica.

La importancia de adoptar un sistema de indicadores de monitoreo y un sistema de alerta temprana se pueden resumir en que:

- √ permite anticipar la sequía, graduar la respuesta y activar medidas proporcionadas (ahorro, reasignación, racionamiento, etc.).
- √ facilita la comunicación con un lenguaje común (categorías y colores), mejorando la transparencia y la coordinación interinstitucional.

Este sistema de índices es indispensable en dos etapas fundamentales de todo plan de sequía: en el diagnóstico y en la implementación.

En la fase de diagnóstico, los planes caracterizan sequías históricas y seleccionan indicadores representativos del sistema (reservas en embalses, volúmenes aportados por ríos, niveles piezométricos, nieve acumulada, precipitación, etc.), definiendo umbrales y fases que desencadenan medidas previamente acordadas.

En la fase de implementación, los planes articulan el seguimiento continuo del índice o índices globales de estado con la ejecución de medidas, todo ello sustentado por mecanismos de monitoreo e informes periódicos.

1.5.2 Importancia

Estratégicamente, los Sistemas de Monitoreo y Alerta Temprana (SMAT) tienen varias razones de importancia:

- √ normativa y de gobernanza: el sistema de indicadores habilita declaraciones formales de escenarios y da cobertura jurídica y técnica a medidas de gestión extraordinarias y proporcionales, constituyendo el eje operativo de los planes de sequía;
- √ eficacia y costo–beneficio: los SMAT son instrumentos costo–efectivos que, bien diseñados, reducen pérdidas y orientan la acción anticipatoria. Hacen una contribución importante a disminuir daños cuando los avisos se emiten y actúan con antelación;
- √ transparencia y legitimidad: umbrales públicos y metodologías reproducibles construyen confianza y facilitan la coordinación interinstitucional y con los usuarios del agua;
- √ aprendizaje continuo: el registro de eventos, informes post sequía y revisión periódica de indicadores cierran el ciclo de mejora del plan y corrigen sesgos o brechas de información.

1.5.3 Antecedentes

1.5.3.1 Conceptos generales

Inicialmente, es importante destacar la diferencia técnica entre: indicadores e índices.

Un indicador es una variable o parámetro (como la precipitación, el caudal o el nivel de embalses) que describe las condiciones de la sequía. Por su parte, un índice es una representación numérica (como el Índice de Precipitación Estandarizado o el Índice Estandarizado de Caudales Fluviales) calculada a partir de uno o más indicadores, diseñada para evaluar cualitativamente la gravedad, localización y duración del fenómeno.

Los índices permiten simplificar relaciones complejas para la toma de decisiones, estableciendo umbrales de gravedad que determinan el inicio y fin de un episodio.

La World Meteorological Organization (WMO), u Organización Meteorológica Mundial (OMM), recomienda que, para el diseño del sistema de monitoreo, se consideren un grupo de índices, a distintas escalas, incorporando variables meteorológicas e hidrológicas:

Meteorológicamente	recomienda el uso del Standardized Precipitation Index (SPI) o Índice de Precipitación Estandarizado, por su capacidad para caracterizar sequías en diversas escalas temporales y climas. La misma OMM ha publicado una guía específica que detalla su metodología de cálculo, usos, fortalezas y limitaciones, lo que permite integrarlo coherentemente en un sistema de monitoreo y alerta temprana.
Hidrológicamente	define el Standardized Streamflow Index (SSI o SSFI) o Índice Estandarizado de Caudales Fluviales, desarrollado mediante valores mensuales de los caudales de ríos y los métodos de normalización asociados al SPI. Se puede calcular con datos de observaciones y de pronósticos, proporcionando una perspectiva de los períodos de niveles altos y bajos de caudal asociados a las crecidas y la sequía.

Esta institución presenta los índices más utilizados a nivel mundial e indica que la mayoría se determinan con la metodología utilizada para el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).

Otro índice importante en la gestión hídrica, entre otros, es el Surface Water Supply Index (SWSI) o Índice de Oferta de Agua Superficial.

1.5.3.2 Standardized Precipitation Index (SPI)

El SPI se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal, teniendo en cuenta la precipitación observada, y transformando la probabilidad de precipitación en un índice. Que la precipitación sea el único parámetro necesario para el cálculo, es una de las ventajas más importantes para el uso de este índice.

Cabe aclarar que en el PEGRIS no utiliza el índice SPI, pero dado que la OMM lo toma como estándar metodológico en los SMAT para el cálculo del resto de los índices, se lo describe en este texto.

El Standardized Precipitation Index (SPI) o Índice de Precipitación Estandarizado se ha concebido para calcular el déficit de precipitación, fundamentalmente lluvia, en diversas escalas temporales, las que reflejan el efecto de la sequía en la disponibilidad de los distintos recursos hídricos.

La OMM ha definido el sistema de clasificación, mostrado en el Cuadro 1.6, de valores de SPI para definir las distintas intensidades de la sequía según sus distintos valores, y con esto los criterios para los episodios de sequía en todas las escalas temporales.

Cuadro 1.6 Clasificación según SPI

Organización Meteorológica Mundial

STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)

Límites	Clasificación	Código
2.0 ≤ SPI	Extremadamente Abundante	
1.5 ≤ SPI < 2.0	Muy Húmedo	
1.0 ≤ SPI < 1.5	Moderadamente Húmedo	
-1.0 ≤ SPI < 1.0	Próximo a lo Normal	
-1.5 ≤ SPI < -1.0	Moderadamente seco	
-2.0 ≤ SPI < -1.5	Severamente Seco	
SPI < -2.0	Extremadamente Seco	

Fuente: Elaboración propia

Los episodios de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1,0 o inferior. El episodio finaliza cuando el SPI alcanza un valor positivo durante un mes, en general, o en dos meses consecutivos, de acuerdo a criterios establecidos previamente en la normativa.

Por consiguiente, todos los episodios de sequía tienen una duración definida por su comienzo y su final. La suma del SPI negativos, para todos los meses de un episodio de sequía, está ligado a la "magnitud" de la sequía.

La normalización estadística que se hace, permite que el SPI determine la intensidad de una sequía y la probabilidad de la precipitación necesaria para que finalice la sequía. También permite que los usuarios comparen con confianza en los resultados sequías históricas y actuales entre distintas localidades climáticas y geográficas cuando evalúan la frecuencia de una determinada sequía.

En razón de que el SPI está normalizado, los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo; por consiguiente, también se puede hacer un seguimiento de los períodos húmedos. No obstante, hay que subrayar que el SPI no es adecuado para los análisis del cambio climático.

1.5.3.2.1 Metodología de cálculo del SPI

El SPI es un indicador probabilístico que transforma las precipitaciones acumuladas de una estación meteorológica a una distribución normal estandarizada. Su cálculo se basa en un registro de precipitación de largo plazo (al menos 30 años) para el período deseado; dicho registro se ajusta a una distribución de probabilidad (usualmente Gamma) y luego se transforma a una distribución normal de media cero. Los valores positivos de SPI indican condiciones húmedas, mientras que los valores negativos indican condiciones secas. La OMM recomienda utilizar el SPI para describir sequía meteorológica y para comparar precipitaciones entre regiones con climas distintos.

La información necesaria para este procedimiento es la precipitación mensual o semanal registrada de forma continua durante más de 30 años. Para cada escala temporal de interés (1, 3, 6, 9, 12 ó 24 meses), se debe construir la serie de precipitación acumulada. En zonas donde pueden existir meses sin lluvia, se debe contabilizar la frecuencia de valores cero y tratarlos explícitamente en el ajuste probabilístico.

La metodología de cálculo abarca los siguientes pasos:

1) Preparar la serie acumulada. Para la escala temporal seleccionada (por ejemplo, 3 meses), se calcula la precipitación total de cada intervalo móvil de 3 meses a lo largo del registro histórico. Esta serie representa la variable a normalizar. Cada mes de un año se compara con los mismos meses de otros años para evitar efectos estacionales.

2) Ajustar una distribución Gamma. La precipitación acumulada presenta asimetría (muchos valores pequeños y pocos valores grandes). La literatura recomienda ajustarla con la distribución Gamma incompleta. Se estiman los parámetros de forma (α) y escala (β) mediante máxima verosimilitud o momentos. En condiciones con alta frecuencia de ceros, se calcula la probabilidad "q" de precipitación cero y se incorpora después.

   La función de densidad de la distribución Gamma se escribe como

$$f_{G(x)} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\,\beta^{\alpha}} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \rightarrow \quad x > 0$$

$$\alpha = \frac{\overline{x}^2}{s^2}$$

$$\beta = \frac{s^2}{\overline{x}}$$

$$\overline{x} = \frac{\sum_1^N x}{N}$$

donde es la función Gamma completa y "x" es la precipitación acumulada. La probabilidad acumulada Gamma "$F_{G\,(x)}$" se obtiene integrando $f_{G(x)}$ desde 0 hasta x; esta integral se calcula numéricamente (función Gamma incompleta). Cuando existe probabilidad de cero precipitación, la probabilidad acumulada se modifica como $P_{G(x)} = q + (1 - q)\, F_{G\,(x)}$.

3) Transformar a distribución normal estándar. La probabilidad acumulada $P_{G(x)}$ se convierte a un valor de la distribución normal estándar mediante la función inversa ,$\Phi^{-1}_{(z-score)}$ resultando este valor el índice SPI buscado. Numerosos paquetes estadísticos implementan Φ^{-1}; si se necesita una aproximación, Abramowitz y Stegun (1965) proporcionan un polinomio para evaluar la función. De forma conceptual:

$$SPI = \Phi^{-1}_{(P_{G(x)})}$$

4) Clasificar la intensidad de la sequía o humedad. McKee y colaboradores proponen categorías basadas en rangos de SPI, como se muestran en el Cuadro 1.6

5) Definir episodios de sequía. El SPI considera que un episodio de sequía comienza cuando el índice es igual o inferior a −1,0 y continúa mientras los valores mensuales sigan siendo negativos. El episodio termina cuando el SPI se vuelve positivo. La magnitud de la sequía es la suma de los valores negativos de SPI durante la duración del episodio.

6) Escalas temporales. La sequía meteorológica fundamentalmente, responde a anomalías de precipitación en escalas cortas (1 a 6 meses), mientras que las sequías hidrológicas requieren escalas de 6 a 24 meses o más. El SPI permite calcular simultáneamente distintos períodos para relacionarlos con la respuesta del suelo, ríos o acuíferos.

Es importante considerar algunas recomendaciones prácticas al momento de calcular con esta metodología:

- se recomiendan series con una longitud de al menos 30 años; a mayor duración, mejor se ajusta la distribución,
- en regiones áridas, la alta frecuencia de valores cero puede dificultar el ajuste de la distribución Gamma. Si la proporción de ceros es muy alta, es conveniente restringir el análisis a la estación lluviosa o utilizar índices alternativos,
- probabilísticamente, el SPI es un índice estandarizado, por lo que los valores extremos (muy altos o muy bajos) tienen la misma probabilidad en cualquier clima, lo que facilita comparaciones regionales.

1.5.3.3 Standardized Streamflow Index (SSFI)

Otro índice dado por la OMM es el Standardized Streamflow Index (SSFI) o Índice Estandarizado de Caudales Fluviales, que se estima mediante valores de los caudales de los ríos y con los métodos de normalización asociados al SPI, como el visto previamente.

Se puede calcular con datos de observaciones o con pronósticos, proporcionando una perspectiva de los períodos de niveles altos y bajos de caudal asociados a las crecidas y la sequía (ver Cuadro 1.7).

Cuadro 1.7 Clasificación según SSFI

Organización Meteorológica Mundial

ÍNDICE ESTANDARIZADO DE CAUDALES FLUVIALES (SSFI)

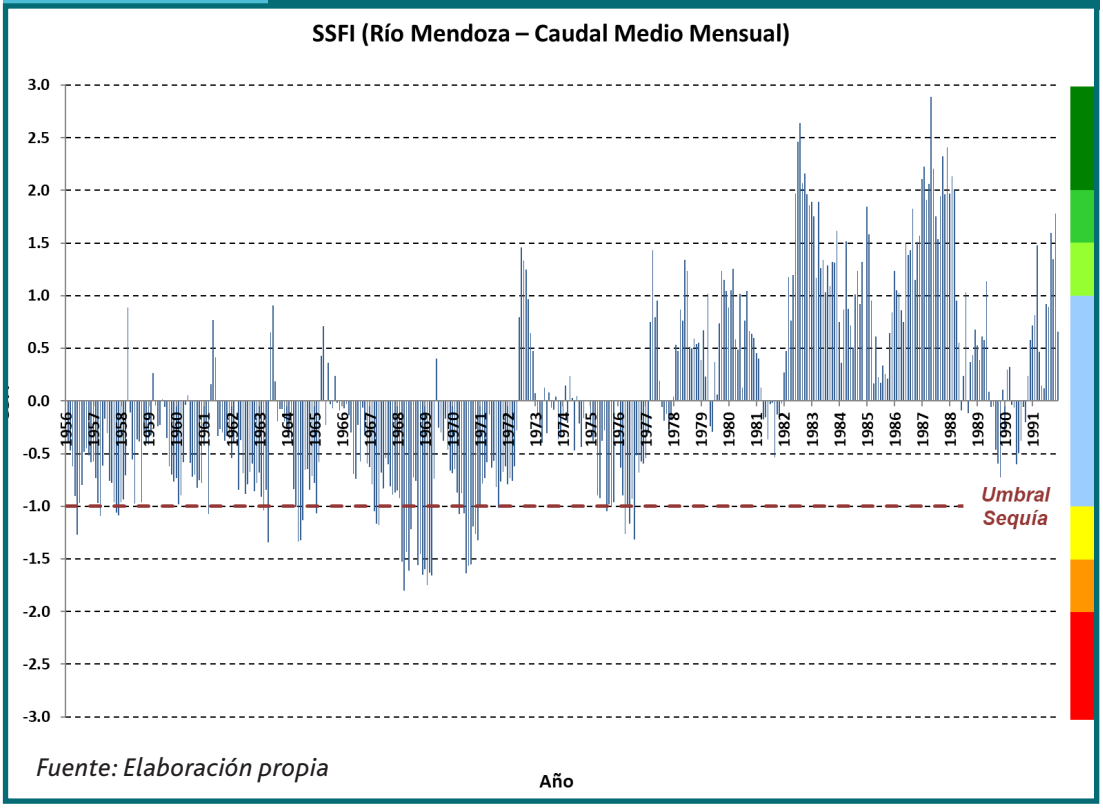
Límites	Clasificación	Código
0 ≤ SSFI	Extremadamente Abundante	
5 ≤ SSFI < 2.0	Muy Abundante	
0 ≤ SSFI < 1.5	Moderadamente Abundante	
0 ≤ SSFI < 1.0	Próximo a lo Normal	
5 ≤ SSFI < -1.0	Sequía Moderada	
0 ≤ SSFI < -1.5	Sequía Severa	
SSFI < -2.0	Sequía Extrema	

Fuente: Elaboración propia

Utiliza como parámetros de entrada, datos diarios, mensuales o anuales de los caudales de los ríos, por lo que es útil para la vigilancia de las condiciones hidrológicas en distintas escalas temporales.

En el Cuadro 1.8 se muestra la serie de SSFI, para período de 1 mes (caudal medio mensual – QMM), a lo largo de 35 años de aforos de la sección Guido, en el río Mendoza. En la misma se puede distinguir tanto las importantes sequías que se presentaron entre los años 1968 a 1971, como los años abundantes de casi toda la década de los '80.

Cuadro 1.8 **Río Mendoza – SSFI (mensual)**



Fuente: Elaboración propia

Cuando se trabaja con caudales mensuales, la estacionalidad es fuerte, especialmente en ríos con régimen termonival: los caudales de enero no son comparables con los de junio.

Por eso, el SSFI mensual se calcula ajustando una distribución Gamma por separado para cada mes calendario, o sea, se realizan 12 ajustes de la función. Para cada mes se estiman α y β por método de momentos, usando solo los valores observados de ese mes (los meses faltantes quedan en blanco y no se tratan como 0).

Luego cada caudal "x" se transforma en una probabilidad acumulada "$F_{G\,(x)}$" (en Excel se utiliza la función DISTR.GAMMA(x,α,β,VERDADERO) y finalmente se normalizan estas probabilidades, obteniendo así el índice normal estándar (con la función de Excel INV. NORM.ESTAND ($F_{G\,(x)}$)).

1.5.3.4 Surface Water Supply Index (SWSI)

El Surface Water Supply Index (SWSI), surgió como complemento del Palmer Drought Severity Index para cuencas de montaña, donde la precipitación es sólida y se acumula como nieve; y abastece a los ríos, o cursos superficiales, a través del deshielo en la temporada estival.

Su objetivo es proporcionar una estimación mensual de la disponibilidad de agua superficial de una cuenca, combinando diferentes componentes hidrológicos: nieve, precipitación líquida, caudal, almacenamiento en embalses y, en versiones posteriores, variables de demanda como la temperatura.

Cada uno de estos componentes se convierte a una probabilidad de no excedencia "$F_{(x)}$" mediante su distribución histórica y luego se pondera con coeficientes que reflejan su contribución al suministro total. El resultado, varía entre +4,2 y −4,2, y describe desde abundancia hídrica hasta sequía extrema.

El SWSI ofrece varias ventajas para la gestión mensual de embalses y sistemas de riego en cuencas de régimen termonival:

- Incorporación de variables hidrológicas claves. Al considerar el equivalente agua de nieve, la precipitación, la escorrentía y el almacenamiento en embalses, el índice refleja las fuentes de agua que alimentarán el sistema en los meses siguientes. Para la gestión hídrica, en especial la del riego agrícola, esto permite anticipar la disponibilidad total de agua, no sólo el comportamiento de la precipitación.
- Comparabilidad entre cuencas. La normalización permite comparar cuencas de distintas magnitudes; un valor negativo de −2 en una cuenca implica las mismas probabilidades de escasez que en otra cuenca con igual valor. Ello facilita las decisiones regionales de asignación de agua y priorización de riegos.
- Uso operativo en planes de sequía. Varios estados de Estados Unidos emplean el SWSI como herramienta de monitoreo y disparador de acciones de emergencia; es particularmente útil en cuencas con riego superficial donde la nieve es la fuente principal de agua.
- Flexibilidad temporal. El índice se calcula mensualmente y se actualiza con los nuevos datos de nieve y embalses. Esto permite ajustar los volúmenes de desembalse y las restricciones de riego de manera continua en la temporada de riego.

En forma simplificada, el procedimiento de cálculo original es el siguiente:

- Para un mes "t" del período invernal (junio–septiembre), el SWSI invernal se calcula como:

$$SWSI_{(t)} = \frac{\left(a * F_{(t)}^{EMB} + b * F_{(t)}^{EAN} + c * F_{(t)}^{PRE}\right) - 50}{12}$$

- Para los meses de primavera–verano (octubre–mayo) se reemplaza la probabilidad del equivalente agua nieve por la probabilidad del caudal pronosticado u observado:

$$SWSI_{(t)} = \frac{\left(a * F_{(t)}^{EMB} + b * F_{(t)}^{CAU} + c * F_{(t)}^{PRE}\right) - 50}{12}$$

Siendo:

$F_{(x)}$ la probabilidad de no excedencia (%) de cada componente calculada a partir de los registros históricos. Como ejemplo: EAN (nieve acumulada al 30 de septiembre),CAU (caudal de diciembre–marzo), EMB (almacenamiento en embalses) o PRE (precipitación mensual).

a, b y c coeficientes de ponderación que representan la proporción en la que cada componente contribuye al suministro de agua de la cuenca. La suma de estos coeficientes debe ser 1. La determinación de a, b y c no es universal; depende de las características hidrológicas de cada cuenca.

–50 / 12 factor que recentra la suma de probabilidades alrededor de cero y normaliza el índice en el rango ± 4,2.

- estos valores se computan para cada cuenca o subcuenca, integrando datos de todas las estaciones relevantes (embalses, sensores de nieve, pluviómetros y aforos) y utilizando longitudes de serie de 30 años o más para asegurar una distribución estable.
- la probabilidad de cada variable puede estimarse mediante distribuciones empíricas (por ejemplo, posiciones de Weibull) o ajustando distribuciones teóricas (Gamma, log-Normal, etc.).
- se evalúan las condiciones hidrológicas clasificando el SWSI en categorías (extremadamente seco, severamente seco, moderadamente seco, cerca de lo normal, húmedo, etc.) según intervalos de ± 1 unidad.

De la bibliografía internacional se pueden considerar algunas conclusiones generales:

√ No existen valores universales para los coeficientes a, b y c. Las ponderaciones de cada coeficiente son específicas de cada cuenca y varían con el régimen hidrológico y la infraestructura existente.

√ En cuencas termonivales, el componente nival y/o el caudal de deshielo, suelen dominar el suministro. Por lo tanto, se le asigna un peso mayor (≥ 0,50). En general, la nieve o el caudal pronosticado explica entre 50 % y 65 % del agua disponible.

√ En cuencas con grandes embalses, éstos reciben un peso más alto (≈ 0,35 - 0,40), ya que el agua almacenada permite regular la disponibilidad a lo largo del año.

√ La precipitación o la lluvia directa suele tener un peso menor (0,10 - 0,20) porque en regiones de nieve la precipitación líquida invernal es baja y su contribución al caudal anual es relativamente pequeña. En climas más húmedos, la lluvia puede alcanzar pesos de 0,45 en los meses lluviosos.

√ Los pesos mensuales variables, calculados de forma objetiva a partir de la distribución estacional de cada componente, permiten que el índice refleje transiciones entre estaciones (por ejemplo, ascenso del peso de la nieve durante el deshielo y descenso del peso de la humedad del suelo).

√ La inclusión de variables de demanda (temperatura, evapotranspiración) en el SWSI–Mod muestra que el índice puede evolucionar hacia un balance oferta/demanda, útil para la planificación del riego y la gestión de embalses en periodos de escasez.

1.6 ÍNDICES ESTANDARIZADOS DEL PEGRIS

Como se ha visto, el objetivo final del estudio de estos índices es nutrir al Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana del Plan Especial de Gestión del Riesgo de Sequías (SMAT-PEGRIS), siguiendo con el criterio de transformar la gestión hídrica en una acción proactiva.

Para los responsables de esta gestión, esto implica:

- El establecimiento de disparadores o desencadenantes (triggers): se definen valores específicos, o umbrales, de los índices que activan medidas de emergencia, como el ajuste de turnos de riego o restricciones de consumo.
- La gestión de la vulnerabilidad: es reconocer que el impacto de la sequía depende no solo de la escasez hídrica, sino también del déficit que generan las exigencias y exposiciones socioeconómicas y el estado fenológico de los cultivos.
- La orientación del SMAT: en regiones como Mendoza, donde ya se han producido sequías meteorológicas e hidrológicas extremas y prolongadas, el sistema de alerta temprana debe orientarse hacia la gestión adaptativa y preventiva, no solo reactiva ante emergencias pasajeras.

Los umbrales son valores numéricos que marcan el límite de una situación de gravedad. Según el PEGRIS, un episodio de "sequía" se activa formalmente cuando el índice correspondiente (INE, IDE, etc.) alcanza un valor de -1,0 o inferior.

Estos parámetros operan de la siguiente manera:

- fijación de fases de gravedad: los umbrales permiten determinar fases progresivas (Moderada, Severa, Extrema), lo que da cobertura jurídica a las declaraciones de emergencia y a la adopción de medidas extraordinarias;
- relación con la intensidad y magnitud: el umbral define no solo el inicio del proceso, sino también su duración (tiempo por debajo del umbral) y magnitud (acumulación del déficit).

La fase operativa de la gestión y la vinculación con estos disparadores se traduce en la implementación de medidas específicas según el nivel de riesgo detectado en cada cuenca (a través de los planes PAGRIS), las que pueden ser:

- Fase de Diagnóstico y Diseño: se utilizan los índices para caracterizar sequías históricas y definir los escenarios prospectivos que activarán las respuestas.
- Fase de Implementación (escenarios escalonados):
    - Prealerta/Vigilancia: activada por anomalías leves; implica campañas de ahorro, actualización de balances hídricos y programación inicial de riego.
    - Alerta: se activa ante umbrales de sequía moderada. Pueden iniciarse ajustes de dotaciones, riego deficitario controlado y la priorización de los usos más críticos.
    - Emergencia: ante umbrales críticos (sequía severa/extrema), pueden ejecutarse reducciones programadas, reasignaciones temporales de agua y se garantiza, por sobre todo, el abastecimiento humano, que es la prioridad absoluta del plan.

El PEGRIS establece que el SMAT es la base operativa que convierte el plan en un instrumento de gestión. Los umbrales se definen dentro de una serie de índices estandarizados, adaptados específicamente para las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la provincia de Mendoza. Estos índices son:

- Índice de Nieve Estándar (INE): representa la Sequía Meteorológica anual basada en las precipitaciones de alta montaña.
- Índice de Derrame Estándar (IDE): identifica la Sequía Hidrológica basándose en el pronóstico de escurrimiento anual (volumen total del río).
- Índice de Reservas Estándar (IRE): monitorea el estado del almacenamiento en los embalses.
- Índice de Caudales Estándar (ICE): permite un seguimiento mensual detallado de los caudales de los ríos.

1.6.1 Índice de Nieve Estándar (INE)

Dado que más del 95% del recurso hídrico de la Provincia de Mendoza proviene de las precipitaciones nivales de invierno, el Departamento General de Irrigación ha definido el INE, con la misma metodología de cálculo del SPI, tomando como escala temporal el "año" y definiendo como valor representativo de la "Sequía Meteorológica" anual.

En sistemas de montaña donde una fracción dominante de la precipitación ocurre como nieve, usar el SPI con lluvia "clásica" introduce un sesgo estructural en el monitoreo:

la lluvia es un buen descriptor del forzante meteorológico de corto plazo en regiones pluviales, pero en cuencas con regímenes termonival la variable que realmente controla el almacenamiento estacional y, por extensión, la oferta hídrica diferida, es la precipitación sólida expresada como equivalente en agua nieve (EAN) o snow water equivalent (SWE) en inglés.

Desde la perspectiva de un sistema de alerta temprana, esto no es sólo concepto académico, ya que si el índice se calcula con lluvia, el algoritmo puede "ver" meses secos en invierno simplemente porque la precipitación cayó mayormente como nieve (y no quedó registrada en la base de lluvia), o puede "ver" meses húmedos en otoño por eventos de lluvia que no aportan almacenamiento estacional relevante.

En cambio, un SPI calculado sobre precipitación de nieve (en equivalente agua nieve) hace coherente el indicador con el proceso físico que se desea vigilar, o sea, la acumulación de nieve que actúa como embalse natural y determina la recarga y el caudal de primavera-verano.

La justificación técnica se vuelve más fuerte cuando el objetivo operacional es anticipar déficits de escorrentía o de aportes a embalses con meses de antelación. La nieve introduce memoria hidrológica, ya que lo que nieva en junio, julio y especialmente agosto, no se traduce inmediatamente en caudal, sino que se acumula y luego se libera por fusión, cuando las condiciones de temperatura y radiación lo favorecen.

En un sistema de monitoreo, el SPI-nieve, o INE, permite detectar tempranamente una escasez o una "sequía nival", aun cuando las variables de verano todavía no exhiben anomalías marcadas. Es por esto que en Mendoza se ha adoptado al INE como indicador de "Sequía Meteorológica".

En la práctica, esto mejora la trazabilidad entre el índice y las decisiones: asignación de volúmenes, programación de riego, gestión de reservas, y comunicación de riesgo con fundamento físico.

El proceso de cálculo conserva la lógica del SPI estándar -transformar una serie de precipitación a una variable normal estándar para comparar anomalías entre estaciones y escalas temporales-, pero requiere dos cuidados adicionales:

- definir correctamente la variable nival de entrada;
- tratar de manera rigurosa los meses sin nevadas.

En un sistema operativo, el primer paso es construir una serie mensual consistente de "precipitación de nieve equivalente en agua" (por ejemplo, mm/mes de EAN), derivada de un pluviómetro calefaccionado o de una red nivométrica, como la que tiene instalada el Sistema de Información Hidronivometeorológica (SIH), del Departamento General de Irrigación, en las altas cuencas de los ríos de la provincia. Lo importante es que la unidad

sea equivalente agua y que la serie sea homogénea en el tiempo (mismo sensor, correcciones de cambios instrumentales, etc.)[2].

Luego es fundamental definir el calendario operativo o de cálculo, ya que si el interés es estrictamente la estación nival, se trabaja con los meses de junio, julio y agosto; si el sistema busca robustez para la acumulación total estacional, puede ampliarse a mayo y septiembre, pero siempre manteniendo que la comparación estadística se haga "mes contra el mismo mes" (junios contra junios, julios contra julios, agostos contra agostos), porque la climatología y la frecuencia de ceros cambia drásticamente fuera del invierno.

Con la serie mensual definida, el cálculo del INE se hace separando por mes calendario y por escala temporal. Si se requiere una escala mensual, se usa directamente el INE mensual de cada mes (INE-1); si se adopta al trimestre como tiempo base para el estudio (INE-3), lo que se persigue es capturar la persistencia de la acumulación invernal, se suman ventanas móviles de 3 meses (por ejemplo, junio-julio-agosto) y se construye una nueva serie de acumulados, que suele ser más estable y menos "cero-inflada".

Esta elección no es neutra para un SAT: el INE-1 responde rápido y es sensible a eventos puntuales; INE-3 o INE-6 filtra ruido y suele correlacionar mejor con impactos hidrológicos.

A partir de allí, el proceso de cálculo estadístico es el mismo: se ajusta una distribución de probabilidad a los valores históricos de la variable (EAN-1 para cada mes, EAN-3 para el trimestre acumulado, etc.), se obtiene la probabilidad acumulada de cada observación, y esa probabilidad se transforma a un valor "z" de una normal estándar, que, por definición es el INE.

La distribución tradicional para precipitación es la Gamma de dos parámetros, porque modela valores positivos y asimetría; sin embargo, la nieve mensual presenta un problema más frecuente que la lluvia en regiones con estacionalidad marcada, ya que aparecen muchos meses con valor de EAN iguales a cero. Esos ceros no se eliminan por defecto, porque pueden contener información importante siempre y cuando indiquen ausencia de nevadas y son parte del régimen climático del mes.

El tratamiento correcto de meses sin nevadas se resuelve con un enfoque de distribución mixta: se separa explícitamente la probabilidad de cero, y se ajusta Gamma sólo sobre los valores positivos. Operacionalmente, para un mes dado (por ejemplo, agosto), se calcula la fracción histórica de años con EAN=0 en ese mes; a esa fracción se la interpreta como la probabilidad discreta "q_0" de "cero". Sobre los años con EAN > 0 se ajusta la Gamma y se obtiene su función de distribución acumulada "$F_{G(EAN)}$".

La probabilidad acumulada total para un valor observado, considerando la corrección por valores nulos, se calcula entonces como:

2 Ver CAPÍTULO 4: MEDICIÓN DE LA NIEVE EN MENDOZA.

$$H_{G(EAN)} \begin{cases} H_{G(EAN)} = q_0 + (1 - q_0) * F_{G(EAN)} \rightarrow si\ EAN > 0 \\ H_{G(EAN)} = \dfrac{n_0 + 1}{2(N+1)} \rightarrow si\ EAN = 0 \end{cases}$$

$$q_0 = \frac{n_0}{N+1}$$

Siendo:

n_0 número de eventos nulos

N número total de eventos

Esta $H_{G(EAN)}$ es la que se transforma luego a normal estándar para producir el INE. Este mecanismo es el que evita un error común en implementaciones rápidas: si se ignoran ceros, se sobrestima la "rareza" de valores pequeños y se generan INE artificialmente extremos; si se fuerza todo a Gamma, incluyendo ceros, el ajuste se degrada y aparecen inestabilidades numéricas.

En un sistema de monitoreo, además, es sumamente importante distinguir entre el "cero meteorológico" y el "cero por falta de dato". Un mes sin nevadas es un dato válido, debe tenerse en cuenta como cero y es la base de la estimación de "q". Por el contrario, un mes sin medición (sensor caído, error de comunicación, dato ausente, etc.) no debe entrar como cero porque distorsiona la frecuencia de ceros y sesga el INE hacia sequía.

Por eso, antes del ajuste estadístico, el proceso debe incorporar un control de calidad de la información, que identifique faltantes, valores imposibles y cambios de régimen por instrumentación. Los faltantes deben quedar como "Not available (NA)" o no disponible, y excluirse del ajuste y del cómputo del INE de ese mes; ya que sólo se computa EAN cuando el mes tiene un valor observado o estimado con trazabilidad.

La estacionalidad invernal del hemisferio sur agrega un detalle práctico que mejora la estabilidad del índice. Dado que junio, julio y agosto (JJA) concentran la acumulación nival -y agosto suele ser el mes de mayor acumulación-, es habitual que fuera de JJA la serie tenga muchos más ceros y, por lo tanto, el INE-1 mensual fuera de invierno pierda poder discriminante (termina reflejando "normalidad de no-nevar" más que anomalías).

Una implementación operativa robusta, entonces, es calcular el INE sólo para los meses invernales (JJA) o para una temporada nival predefinida, y reporta explícitamente "NA" fuera de esa ventana. Esto no limita el sistema; al contrario, evita que el sistema de alerta entregue señales engañosas en meses donde la nieve no es el fenómeno dominante.

Finalmente, una vez calculado, el INE se integra al esquema de alerta con umbrales análogos a los del SPI tradicional (valores negativos indican escasez respecto de la climatología histórica del mes/escala). Ver Cuadro 1.9.

Con esta metodología del INE, el sistema no sólo estandariza la nieve para hacerla com-

parable en el tiempo, sino que también respeta la física de la cuenca y la estadística de ceros, que es el punto crítico cuando se trabaja con meses sin nevadas.

Cabe aclarar que para el INE se han adoptado los umbrales generales del SPI, aunque puede verse que se han incorporado dos nuevos umbrales. Para el SPI, la clase "Próximo a lo Normal" es -1.0 ≤ SPI < 1.0. Dentro del SMAT-PEGRIS este rango se ha subdividido en tres clases: "Nevadas Abundantes" (0.3 ≤ INE < 1.0), "Nevadas Normales" (-0.3 ≤ INE < 0.3) y "Nevadas Escasas" (-1.0 ≤ INE < -0.3).

Cuadro 1.9 Índice Nevadas Estándar (INE) del SMAT - PEGRIS

Organización Meteorológica Mundial		
ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTÁNDAR (SPI)		
Límites	Clasificación	Código
2.0 < SPI	Extremadamente Abundante	
1.5 ≤ SPI < 2.0	Muy Húmedo	
1.0 ≤ SPI < 1.5	Moderadamente Húmedo	
-1.0 ≤ SPI < 1.0	Próximo a lo Normal	
-1.5 ≤ SPI < -1.0	Moderadamente seco	
-2.0 ≤ SPI < -1.5	Severamente Seco	
SPI < -2.0	Extremadamente Seco	

Departamento General de Irrigación		
INDICE NEVADAS ESTANDAR (INE)		
Límites	Clasificación	Código
2.0 ≤ INE	EXTREMADAMENTE ABUNDANTE	
1.5 ≤ INE < 2.0	MUY ABUNDANTE	
1.0 ≤ INE < 1.5	MODERADAMENTE ABUNDANTE	
0.3 ≤ INE < 1.0	NEVADAS ABUNDANTES	
-0.3 ≤ INE < 0.3	NEVADAS NORMLES	
-1.0 < INE ≤ -0.3	NEVADAS ESCASAS	
-1.5 < INE ≤ -1.0	SEQUÍA METEOROLÓGICA MODERADA	
-2.0 < INE ≤ -1.5	SEQUÍA METEOROLÓGICA SEVERA	
INE ≤ -2.0	SEQUÍA METEOROLÓGICA EXTREMA	

Fuente: Elaboración propia

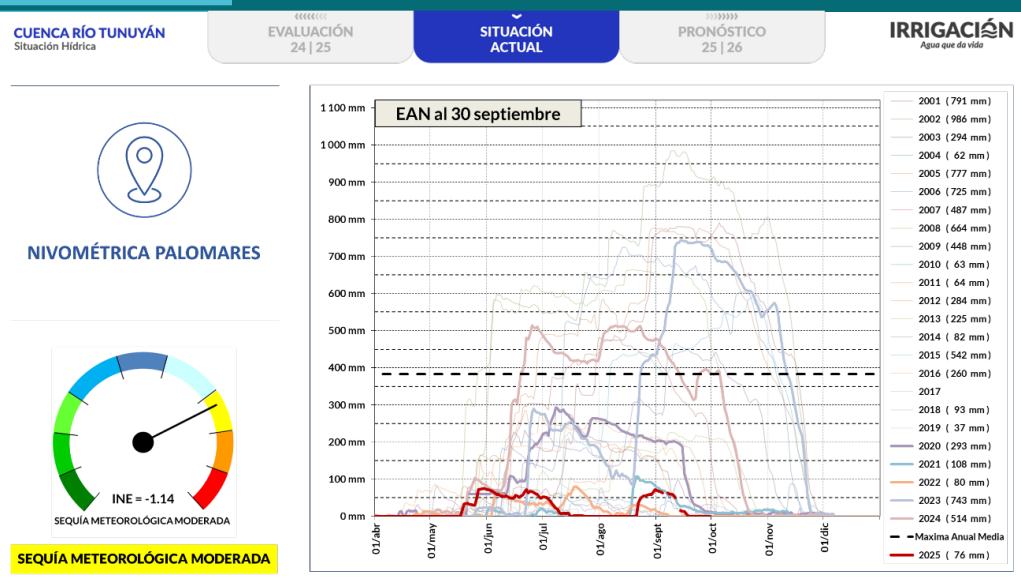
Esta subdivisión da mayor capacidad de gestión al sistema de alerta, ya que permite establecer niveles de aleta temprana más rápidamente que con la clasificación original del SPI, dado que aparece la clase "Nevadas Escasas", con la consiguiente acción preventiva correspondiente, la que no existiría con la clasificación de "Próxima a lo Normal" del SPI.

En el Cuadro 1.10 se observa la implementación del INE que ha realizando el Departamento General de Irrigación en la gestión, por ejemplo, en el "Pronóstico de Escurrimientos de los Ríos Provinciales" que realiza anualmente, el que sirve de disparador de gran parte de las tareas de la planificación anual.

El Cuadro 1.11 muestra los valores del INE, para las temporadas invernales completas, obtenidos con los datos de EAN diarios la Estación Nivometeorológica de Laguna del Diamante, perteneciente al Sistema de Información Hidronivometeorológica (SIH), donde se puede apreciar la escasez y sequía meteorológica que se produjo en la década del 2010 al 2022.

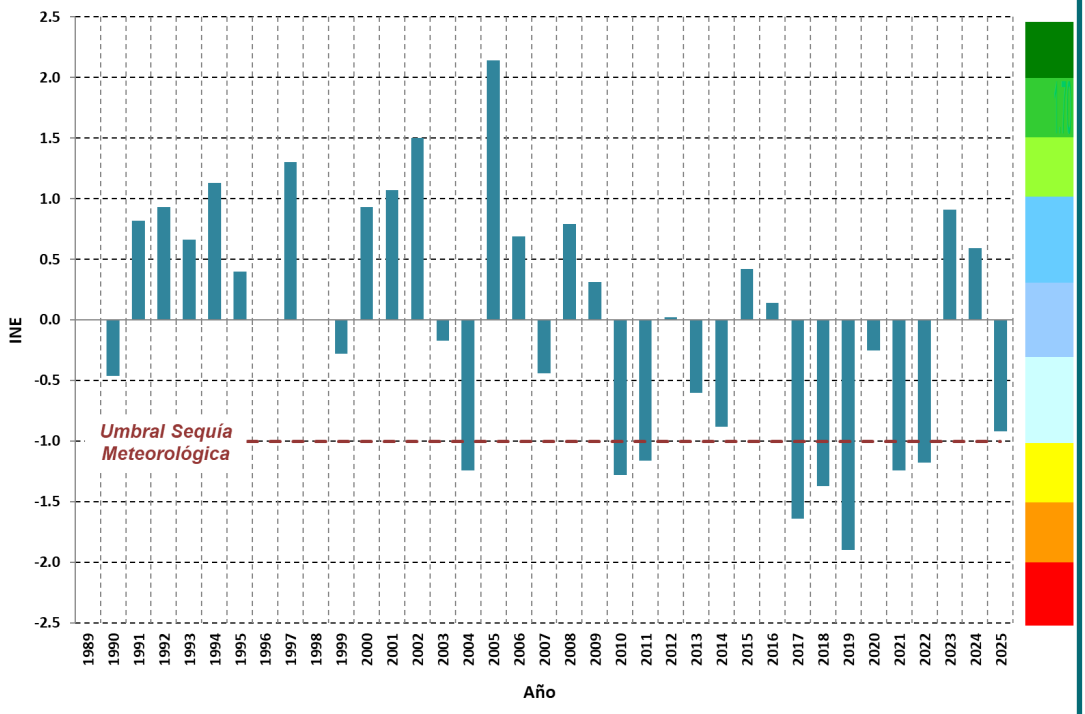
1.6.2 Índice de Caudales Estándar (ICE)

Cuadro 1.10 Índice Nevadas Estándar (INE) en la gestión hídrica



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 1.11 Anual - Est. Laguna del Diamante (SIH)



Fuente: Elaboración propia

El Índice de Caudales Estándar (ICE) que utiliza el Departamento General de Irrigación (DGI) de Mendoza es la versión regional del Standardized Streamflow Index (SSFI), por lo que son válidos todos y cada uno de los conceptos vertidos en el apartado 1.5.3.3 de este capítulo.

Originalmente, el SSFI se creó para detectar eventos de sequía hidrológica a partir de caudales mensuales y utiliza la misma lógica de normalización que el Standardized Precipitation Index (SPI), permitiendo analizar períodos húmedos y secos, además de la gravedad de dichos episodios. Cabe aclarar que, en la determinación del ICE, no sólo se ha utilizado el ajuste a una función Gamma, sino que se han evaluado varias otras, las que han tenido mejores ajustes en varios casos.

La información que requiere son series mensuales de caudales, o caudales medios mensuales (QMM), idealmente provenientes de una sección de aforos en un río, lo que permite que se calcule a diferentes escalas temporales y admite valores faltantes. También puede utilizarse con caudales pronosticados.

Las ventajas son la facilidad de uso y la posibilidad de examinar varias escalas, mientras que las limitaciones se derivan de que solo emplea una variable (caudal) y puede distorsionarse ante periodos sin flujo.

Como se explicará posteriormente, un evento de especial importancia en la planificación anual de la distribución de agua en todas las cuencas de la provincia y para todos los usos, es el Pronóstico de Escurrimientos de los Ríos de Mendoza, que se realiza y publica a finales del mes de setiembre de cada año. En este pronóstico se utiliza el Índice de Derrames Estándar (IDE) para definir la aparición, o no, de una Sequía Hidrológica en cada una de las cuencas, para la temporada, o año hidrológico, que va del 01 de octubre de un año al 30 de setiembre del siguiente. Como se ve, esta es una clasificación que tiene una escala anual, ya que abarca un año completo.

Además de pronosticar el derrame anual (volumen total escurrido en un año), se pronostican los caudales medios mensuales que se esperan, existiendo una gran diferencia en la precisión que se logra en el pronóstico de derrame anual, por un lado, respecto de los pronósticos de caudales medios mensuales, por otro.

El pronóstico que realiza el DGI del derrame de cada río, históricamente ha tenido excelentes resultados y las diferencias con los valores reales que se registran posteriormente, son muy bajas, generalmente menores al 10%.

Por el contrario, las diferencias entre los caudales medios mensuales pronosticados y los reales, son significativamente mayores. Esto se debe a que los caudales mensuales dependen, no sólo de la cantidad de nieve que precipitó en el invierno, sino que están ligados directamente con las temperaturas de alta montaña, que son las que generan los aportes a los ríos. El problema es que en la actualidad no se cuenta con pronósticos de temperaturas de alta montaña, lo que genera estas significativas diferencias, toda vez que no se conoce cómo se comportará la meteorología durante los meses siguientes.

Es en este sentido en donde se hace evidente la utilización del ICE, ya que al tener una escala mensual, permite el seguimiento casi permanente de la situación de los escurrimientos, permitiendo tomar medidas de muy corto plazo, especialmente en las zonas de cultivos bajo riego. O sea, este índice ICE también caracteriza la "Sequía Hidrológica", pero con una escala mensual.

Los responsables de la distribución de dotaciones en general, y para riego agrícola en particular, pueden monitorear el ICE de cada mes, con las demandas registradas en canales o unidades de riego. Un ICE moderadamente negativo indica disponibilidad cercana a la media, mientras que valores severos obligan a reducir entregas. El contraste de este índice con tablas de demandas de cultivo permite elaborar programas de riego más realistas y priorizar cultivos permanentes sobre cultivos anuales. Las escalas multimensuales (ICE-3 o ICE-6) ayudan a anticipar déficits prolongados y ajustan el calendario de riego antes de que aparezcan crisis económicas.

En conclusión, el ICE constituye una herramienta central en los sistemas de alerta temprana en regiones irrigadas como Mendoza, ya que permite detectar anomalías de caudal a escala mensual y apoyar decisiones sobre uso del agua, gestión de emergencias y adaptación al cambio climático. Su integración con índices de demanda y de reservas en embalses, permite transitar de un enfoque exclusivamente hidrológico a uno agro – hidrológico que de respaldo a la caracterización de la Sequía Agronómica y las necesidades de riego.

En el Cuadro 1.12 se muestra el seguimiento mensual que se ha realizado del ICE en el Río Atuel. Cabe aclarar que para el ICE se han adoptado los umbrales generales del SSFI, aunque se han incorporado dos nuevos umbrales dentro de la clase "Próximo a lo Normal" del SPI, con el mismo criterio ya explicado para el INE.

Dentro del contexto del plan de sequía, durante el análisis de vulnerabilidad de cada cuenca, es probable que se tengan que dar valores que identifiquen la "gravedad" de una sequía.

Según la OMM, un "episodio de sequía" se identifica en una serie temporal de un índice estandarizado (ICE) cuando los valores permanecen en el tramo seco y están por debajo de un umbral definido (ICE [5] -1.0 o menor); el episodio termina cuando el índice vuelve a estar por encima de ese umbral (ver Cuadro 1.5).

Cuadro 1.12 **ICE Mensual – Río Atuel - Sección La Angostura (SIH)**

TEMPORADA	ICE - RIO ATUEL											
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
99 / 00												
00 / 01								1.64	1.59		1.73	
01 / 02	1.60		1.55									1.72
02 / 03	1.75	1.77		1.54		1.89			1.61			
03 / 04							1.63					
04 / 05												
05 / 06	1.56	1.83	1.58	1.98		1.71	1.93	1.73				1.68
06 / 07	1.56	1.55		1.57			1.71					
07 / 08												
08 / 09												
09 / 10												
10 / 11												
11 / 12												
12 / 13												
13 / 14												
14 / 15												
15 / 16												
16 / 17												
17 / 18												
18 / 19												
19 / 20												
20 / 21												
21 / 22												
22 / 23												
23 / 24												
24 / 25												

Fuente: Elaboración propia

En este caso quedan bien definidas la duración, la intensidad y la magnitud del episodio

Duración es la cantidad de meses consecutivos "D" que dura el episodio, o sea, que el ICE es menor que -1.0.

Intensidad considerando el valor del índice "ICE_t^S" en cada mes durante el episodio o la "severidad mensual", la Intensidad es el promedio de estos valores.

$$\bar{I} = \frac{1}{D}\sum_{t=1}^{t=D} ICE_t^S$$

Intensidad máxima es el menor valor o más extremo, del "ICE_t^S".

$$I_{máx} = minimo(ICE_t^S)$$

Magnitud

es la acumulación de la intensidad " ICE_t^S " a lo largo de toda la duración del episodio. Para que la magnitud sea un número positivo (más intuitivo), se usa el signo cambiado.

$$M = -\sum_{t=1}^{t=D} ICE_t^S$$

Ahora, cuál de estos parámetros (intensidad media, máxima o magnitud) da mejor referencia de la gravedad de una sequía, depende de lo que se entienda por "gravedad", ya que duración y déficit acumulado no siempre se mueven juntos.

En la práctica operativa, el parámetro que mejor resume la gravedad "total" de un episodio suele ser la magnitud "M", porque integra simultáneamente cuán seco fue y por cuánto tiempo.

La intensidad máxima " I_{max}" es el mejor descriptor del pico o "golpe" más severo dentro del episodio. Es muy útil para disparar alertas por impacto agudo (p. ej., fallas rápidas de abastecimiento, restricciones inmediatas), pero puede sobreestimar episodios cortos y extremos frente a episodios largos y moderados.

La intensidad media "I " describe cuán seco fue "en promedio" el evento, y es buena para comparar episodios de distinta duración sin que los largos "ganen por acumulación". Pero justamente por eso, si la pregunta es "qué evento fue más grave para el sistema" (riego, embalses, dotaciones), la media puede subestimar el daño de sequías persistentes.

En general, si se debe elegir un valor para reportar episodios y ranking de sequías, conviene usar la magnitud acompañada siempre con la referencia de la duración y malos extremo o máximo, porque dos sequías pueden tener igual magnitud, pero una ser corta-extrema y otra larga-moderada, con impactos y decisiones distintas.

En el Cuadro 1.13 se muestra la comparación de los episodios de sequías de 4 o más meses, que se han producido en la sección de aforos de Guido, del río Mendoza, desde que se inició su registro, en el año 1956.

1.6.3 Índice de Derrame Estándar (IDE)

El Departamento General de Irrigación de Mendoza realiza anualmente un pronóstico de derrames para estimar el volumen total escurrido de los ríos de la provincia. El derrame anual se define como el volumen de agua que pasa por una sección durante un año, calculado a partir de caudales "Q", ya sea, medios diarios (QMD) o integrados en medios mensuales (QMM) o pronosticados.

Cuadro 1.13 Comparación de sequías por ICE – Río Mendoza

INICIO	FIN	DURACIÓN	INTENSIDAD		MAGNITUD
			MEDIA	MAXIMA	
abr-69	oct-69	7 meses	-1.71	-1.95	11.99
dic-70	jul-71	8 meses	-1.42	-1.81	11.35
sept-68	ene-69	5 meses	-1.58	-1.85	7.92
feb-22	jun-22	5 meses	-1.42	-1.69	7.09
oct-76	feb-77	5 meses	-1.20	-1.44	5.98
sept-96	dic-96	4 meses	-1.29	-1.52	5.17
oct-10	ene-11	4 meses	-1.29	-1.40	5.15
nov-64	feb-65	4 meses	-1.28	-1.46	5.11
jul-11	oct-11	4 meses	-1.25	-1.52	5.02
sept-19	dic-19	4 meses	-1.22	-1.38	4.90
jul-15	oct-15	4 meses	-1.05	-1.08	4.21

Fuente: Elaboración propia

En hidráulica o en hidrología, la relación entre caudal y volumen es directa, ya que el área bajo un hidrograma $(\int Qdt)$ representa el volumen total escurrido. Integrar el caudal medio durante un periodo Δt produce el volumen acumulado:

$$V = \int Qdt \cong \sum \bar{Q} * \Delta t$$

Por tanto, los volúmenes anuales no son más que la suma temporal de caudales; desde el punto de vista estadístico constituyen la misma variable hidrológica integrada en otra escala temporal. Esta relación lineal implica que el volumen anual es una combinación lineal de los caudales; cualquier transformación estadística que se aplique a los caudales se puede aplicar a los volúmenes sin alterar la información de probabilidad.

El Standardised Streamflow Index (SSFI) está recomendado por la Organización Meteorológica Mundial para caracterizar las Sequías Hidrológicas porque describe la ocurrencia, duración, magnitud, frecuencia y cobertura espacial de periodos secos y húmedos usando datos de caudal. Como se vio, el SSFI adopta la metodología de cálculo del Standardized Precipitation Index (SPI), al igual que lo hace el IDE, sólo que éste sustituye la precipitación por caudal.

Por otro lado, el SPI utiliza una distribución Gamma; sin embargo, para el SSFI distintos autores han propuesto la utilización de otras distribuciones, como la Log-Normal,

Pearson III, Log-Logística o Weibull. La elección de la función de distribución de probabilidad depende de la cuenca, pues el ajuste varía con la variabilidad espacial de los caudales. Los parámetros se estiman con métodos como los momentos L para garantizar un ajuste robusto. Una vez calculada la probabilidad acumulada F(x) de cada valor observado, esta es transformada a una variable normal estándar utilizando la función de distribución normal inversa con media cero y varianza uno.

Este ha sido el criterio utilizado por el DGI para la determinación del IDE, evaluando la bondad de ajuste de varias distribuciones, solo que a los volúmenes anuales. Es por eso que se conserva la estructura del algoritmo, ya que los volúmenes agregados se ajustan a una distribución, se calculan probabilidades y se transforman a la distribución normal estándar.

La transformación es lineal y monotónica; por tanto, los percentiles y la clasificación de sequía son coherentes tanto si se utiliza la serie de caudales como si se usa su integral temporal. El uso de volúmenes, al igual que de caudales acumulados, permite captar la variabilidad interanual y eliminar fluctuaciones de alta frecuencia, lo que es adecuado para el pronóstico de derrames.

Por lo tanto, el uso de la metodología del SSFI para calcular el Índice de Derrames Estándar (IDE) es técnicamente sólido porque se basa en la misma estructura estadística que ha demostrado ser eficaz para caracterizar Sequías Hidrológicas y de esta manera ha sido adoptado por el DGI para la clasificación de este tipo de sequía.

Otra diferencia entre el SSFI y el IDE es que para éste se han incorporado dos nuevos umbrales. Para el SSFI, la clase "Próximo a lo Normal" es $-1.0 \leq SSFI < 1.0$. En el SMAT-PEGRIS este rango se ha subdividido en: "Húmedo" ($0.3 \leq IDE < 1.0$), "Normal" ($-0.3 \leq IDE < 0.3$) y "Escaso" ($-1.0 \leq IDE < -0.3$). Ver Cuadro 1.14.

Como referencia de los resultados que se utilizan en distintas actividades de la gestión, se puede ver en el Cuadro 1.15 los valores límites para cada clase del IDE, considerando el registro completo de cada río. Esto sirve como referencia, por ejemplo, para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo que cada cuenca tendrá que hacer como parte del PAGRIS.

Otra aplicación del IDE es comparar la meteorología entre distintas cuencas y periodos históricos. En el Cuadro 1.16 se muestran las sequías que se han producido en las distintas cuencas de la provincia de Mendoza, desde que se tiene registro histórico de caudales.

Esta información permite confirmar que:

- √ Para el río Mendoza, tanto la sequía entre 1967/1971 y la ocurrida entre 2019/2022 tuvieron una duración de 3 temporadas, aunque la primera tuvo mayor severidad;
- √ Para el resto de los ríos provinciales, coincide que la peor sequía registrada en cada uno, fue la ocurrida este siglo, entre los años 2017/2023, con una duración de 6 temporadas;

Cuadro 1.14 Clasificación según SSFI e IDE

Organización Meteorológica Mundial		
ÍNDICE NORMALIZADO DE CAUDALES FLUVIALES (SSFI)		
Código	Límites	Clasificación
	2.0 < SSFI	Extremadamente abundante
	1.5 ≤ SSFI < 2.0	Muy abundante
	1.0 ≤ SSFI < 1.5	Moderadamente abundante
	-1.0 ≤ SSFI < 1.0	Próximo a lo normal
	-1.5 ≤ SSFI < -1.0	Sequía moderada
	-2.0 ≤ SSFI < -1.5	Sequía severa
	SSFI < -2.0	Sequía extrema

Departamento General de Irrigación		
INDICE DE DERRAMES ESTANDAR (IDE)		
Límites	Clasificación	Código
2.0 ≤ IDE	Extremadamente abundante	
1.5 ≤ IDE < 2.0	Muy abundante	
1.0 ≤ IDE < 1.5	Moderadamente abundante	
0.3 ≤ IDE < 1.0	Húmedo	
-0.3 ≤ IDE < 0.3	Normal	
-1.0 < IDE ≤ -0.3	Escaso	
-1.5 < IDE ≤ -1.0	Sequía hidrológica moderada	
-2.0 < IDE ≤ -1.5	Sequía hidrológica severa	
IDE ≤ -2.0	Sequía hidrológica extrema	

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 1.15 Índice Derrame Estándar – Valores límites de clase

INDICE DERRAME ESTANDAR IDE	RIO MENDOZA Guido		RÍO TUNUYÁN Valle de Uco		RÍO DIAMANTE La Jaula		RÍO ATUEL La Angostura		RÍO GRANDE La Gotera	
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO
Extremadamente abundante		2514 hm³		1548 hm³		2011 hm³		1788 hm³		6579 hm³
Muy abundante	2514 hm³	2138 hm³	1548 hm³	1314 hm³	2011 hm³	1651 hm³	1788 hm³	1557 hm³	6579 hm³	5369 hm³
Moderadamente abundante	2138 hm³	1817 hm³	1314 hm³	1115 hm³	1651 hm³	1356 hm³	1557 hm³	1356 hm³	5369 hm³	4382 hm³
Húmeda	1817 hm³	1448 hm³	1115 hm³	885 hm³	1356 hm³	1028 hm³	1356 hm³	1117 hm³	4382 hm³	3297 hm³
Normal	1448 hm³	1192 hm³	885 hm³	727 hm³	1028 hm³	812 hm³	1117 hm³	946 hm³	3297 hm³	2584 hm³
Escasa	1192 hm³	949 hm³	727 hm³	578 hm³	812 hm³	616 hm³	946 hm³	779 hm³	2584 hm³	1944 hm³
Sequía hidrológica moderada	949 hm³	807 hm³	578 hm³	490 hm³	616 hm³	505 hm³	779 hm³	678 hm³	1944 hm³	1587 hm³
Sequía hidrológica severa	807 hm³	686 hm³	490 hm³	416 hm³	505 hm³	415 hm³	678 hm³	590 hm³	1587 hm³	1295 hm³
Sequía hidrológica extrema	686 hm³		416 hm³		415 hm³		590 hm³		1295 hm³	

Temporada IDE = 0	1314 hm³	802 hm³	912 hm³	1024 hm³	2930 hm³

Fuente: Elaboración propia

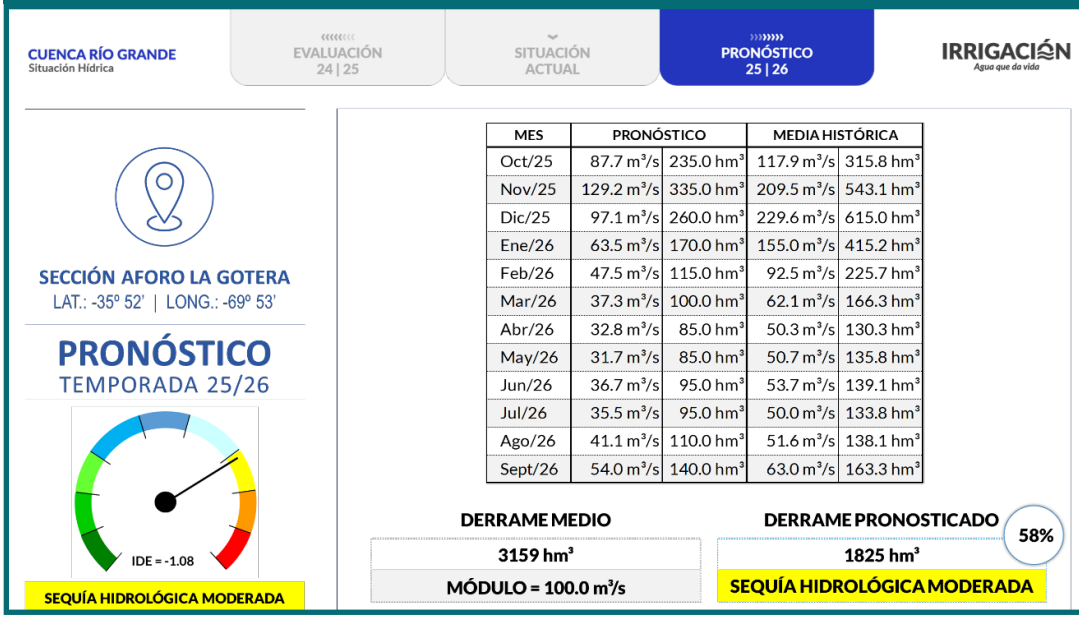
- √ Tanto en la sección Guido (río Mendoza) y Valle de Uco (río Tunuyán) no hay registros históricos de que se hayan producido "Sequías Extremas", lo que sí ha ocurrido en los otros dos ríos (Diamante y Atuel).
- √ Por último, como se comentara previamente, el DGI utiliza el IDE tanto para la clasificación de cada temporada al realizar el pronóstico (Cuadro 1.17), como para evaluar los pronósticos de la temporada anterior (Cuadro 1.18).

Cuadro 1.16 Índice Derrame Estándar Sequías en cuencas de Mendoza

TEMP	RÍO MENDOZA	RÍO TUNUYÁN	RÍO DIAMANTE	RÍO ATUEL
1911 / 1912	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA			
1938 / 1939				SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
1939 / 1940	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA			
1946 / 1947				SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
1950 / 1951	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA			
1956 / 1957	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
1964 / 1965	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA			
1967 / 1968	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA			
1968 / 1969	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA		SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA
1970 / 1971	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA			SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA
1976 / 1977	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	
1996 / 1997	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	
1998 / 1999			SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2010 / 2011	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2011 / 2012		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2012 / 2013				
2013 / 2014			SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2014 / 2015		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2016 / 2017				
2017 / 2018		SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2018 / 2019		SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2019 / 2020	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA	SEQUÍA HIDROLÓGICA EXTREMA	SEQUÍA HIDROLÓGICA EXTREMA
2020 / 2021	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA
2021 / 2022	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA	SEQUÍA HIDROLÓGICA EXTREMA	SEQUÍA HIDROLÓGICA EXTREMA
2022 / 2023		SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA	SEQUÍA HIDROLÓGICA EXTREMA	SEQUÍA HIDROLÓGICA SEVERA

Fuente: Elaboración propia

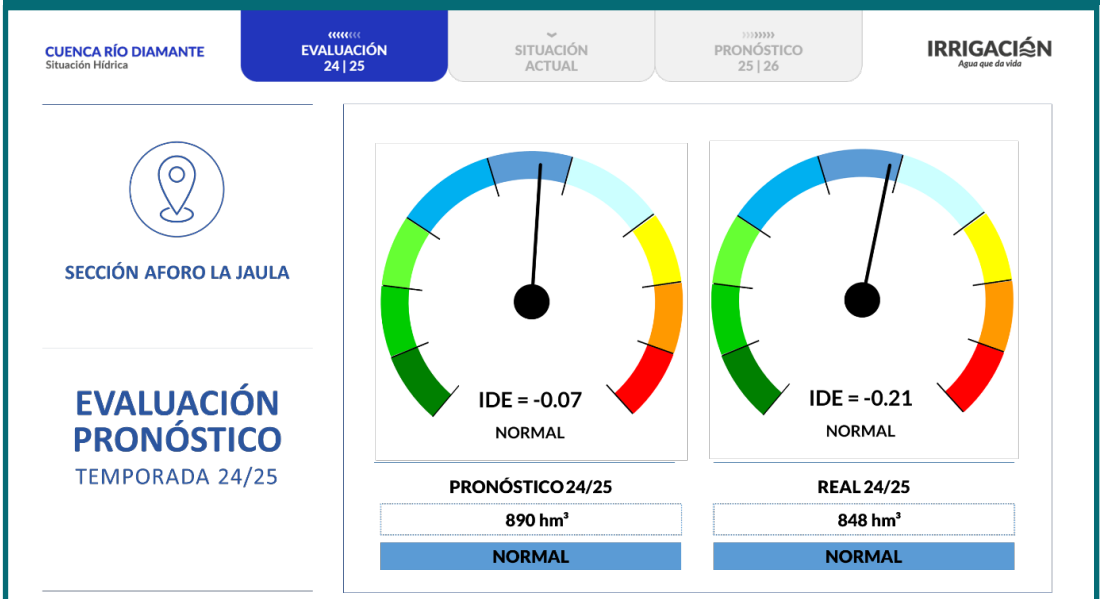
Cuadro 1.17 Índice Derrame Estándar Pronóstico de escurrimientos



MES	PRONÓSTICO		MEDIA HISTÓRICA	
Oct/25	87.7 m³/s	235.0 hm³	117.9 m³/s	315.8 hm³
Nov/25	129.2 m³/s	335.0 hm³	209.5 m³/s	543.1 hm³
Dic/25	97.1 m³/s	260.0 hm³	229.6 m³/s	615.0 hm³
Ene/26	63.5 m³/s	170.0 hm³	155.0 m³/s	415.2 hm³
Feb/26	47.5 m³/s	115.0 hm³	92.5 m³/s	225.7 hm³
Mar/26	37.3 m³/s	100.0 hm³	62.1 m³/s	166.3 hm³
Abr/26	32.8 m³/s	85.0 hm³	50.3 m³/s	130.3 hm³
May/26	31.7 m³/s	85.0 hm³	50.7 m³/s	135.8 hm³
Jun/26	36.7 m³/s	95.0 hm³	53.7 m³/s	139.1 hm³
Jul/26	35.5 m³/s	95.0 hm³	50.0 m³/s	133.8 hm³
Ago/26	41.1 m³/s	110.0 hm³	51.6 m³/s	138.1 hm³
Sept/26	54.0 m³/s	140.0 hm³	63.0 m³/s	163.3 hm³

DERRAME MEDIO	DERRAME PRONOSTICADO	
3159 hm³	1825 hm³	58%
MÓDULO = 100.0 m³/s	SEQUÍA HIDROLÓGICA MODERADA	

Cuadro 1.18 Índice Derrame Estándar
Evaluación del pronóstico



Fuente: Elaboración propia

1.6.4 Índice de Reservas Estándar (IRE)

La OMM define el Índice Normalizado del Suministro de Embalses (SRSI, por sus siglas en inglés Standardized Reservoir Supply Index) y lo presenta como un método sistemático para analizar los datos de los embalses en condiciones de sequía, con características similares al SPI ya que se utilizan datos mensuales para calcular la función de distribución de probabilidad de los datos de almacenamiento de los embalses, a fin de suministrar información sobre el abastecimiento de agua de una región o cuenca dentro de una gama de −3 (extremadamente seco) a +3 (extremadamente húmedo), ofreciendo información a los responsables del abastecimiento de agua y los proveedores de riego. No tiene en cuenta los cambios ocasionados por la gestión del embalse ni las pérdidas causadas por la evaporación.

El DGI, responsable de la administración del todo el recurso hídrico provincial, debe informar permanentemente a los distintos usuarios sobre la situación hídrica de cada cuenca, siendo uno de los parámetros más solicitados, los volúmenes o reservas en los embalses, tanto en la actualidad, como en relación a los años anteriores.

Es por eso que ha definido el IRE (Cuadro 1.19), con la misma metodología que los índices anteriores.

Cuadro 1.19 Índice de Reservas Estándar - IRE

Departamento General de Irrigación		
INDICE RESERVAS ESTANDAR		
Límites	**Clasificación**	**Código**
2.0 ≤ IRE	RESERVAS EXTREMADAMENTE ALTAS	
1.5 ≤ IRE < 2.0	RESERVAS MUY ALTAS	1.70
1.0 ≤ IRE < 1.5	RESERVAS MODERADAMENTE ALTAS	
0.3 ≤ IRE < 1.0	RSERVAS ABUNDANTES	
-0.3 ≤ IRE < 0.3	RESERVAS NORMALES	
-1.0 < IRE ≤ -0.3	RESERVAS ESCASAS	
-1.5 < IRE ≤ -1.0	RESERVAS MODERADAMENTE BAJAS	
-2.0 < IRE ≤ -1.5	RESERVAS SEVERAMENTE BAJAS	
IRE ≤ -2.0	RESERVAS EXTREMADAMENTE BAJAS	

Fuente: Elaboración propia

Al igual que los índices de caudales y de nieve, sirve de información de base para el próximo índice que está en proceso de validación en la gestión hídrica de Mendoza, el Índice de Oferta de Agua Superficial.

1.6.5 Índice de Oferta de Agua Superficial (IOAS)

El Índice de Oferta de Agua Superficial (IOAS) es una adaptación regional del Surface Water Supply Index (SWSI), presentado previamente, que está siendo validado por el Departamento General de Irrigación de Mendoza. Se basa en la misma filosofía de combinar variables hidrológicas en una escala estándar, pero se ajusta a las particularidades climáticas y de datos de la provincia.

Una de las particularidades del ajuste es que el IOAS incluye únicamente tres componentes: caudales de los ríos, equivalente de agua en nieve y reservas en embalses. La precipitación pluvial se considera despreciable en las cuencas de Mendoza, ya que las lluvias invernales son escasas y la escorrentía superficial se origina casi exclusivamente de la nieve.

Por otro lado, y a diferencia del SWSI original, el IOAS utiliza una sola fórmula durante todo el año, sin intercambiarla entre invierno y verano:

$$IOAS_m = \frac{\left(a_m * F^E + b_m * F^N + c_m * F^Q\right) - 50}{12}$$

$$a_m + b_m + c_m = 1$$

Siendo:

m	mes del año en el que se está computando el IOAS;
F^E	la probabilidad de no excedencia, o la función de distribución acumulada, de las reservas en embalses;
F^N	la probabilidad de no excedencia, o la función de distribución acumulada, de la nieve, en equivalente agua nieve (EAN);
F^Q	la probabilidad de no excedencia, o la función de distribución acumulada, de los caudales del río;
$a_m, b_{m,} c_m$	ponderación de cada componente (caudal, EAN y reservas) para cada mes. Cambian mes a mes, a lo largo del año;
$\frac{(\ )-50}{12}$	factores que centran y normalizan el índice.

El IOAS se interpreta en las mismas categorías que el SWSI, o sea, valores negativos indican una oferta superficial menor a la histórica, por un lado, mientras que valores superiores a +2.0 indican una disponibilidad muy superior a la registrada anteriormente.

El punto más importante en el cálculo y validación de este índice es la estimación de la ponderación de cada componente. En el SWSI original existen dos enfoques conceptualmente diferentes para determinar las ponderaciones: el método de Colorado y el de Óregon.

El método de Colorado fue el primero en proponerse y emplea dos conjuntos de coeficientes fijos definidos por expertos, que se mantienen constantes dentro de cada temporada: uno para invierno y otro para verano. Estos valores se basan en la experiencia de operadores y reflejan la importancia percibida de cada componente; por ejemplo, durante el invierno se da mayor peso a la nieve y la precipitación ($\alpha \approx$ 0,5 - 0,6), mientras que en verano el caudal y las reservas adquieren mayor importancia. Se trata por tanto de un método subjetivo: los pesos se eligen a partir del juicio humano y pueden variar entre cuencas sin seguir un criterio estadístico.

El método de Oregón, desarrollado posteriormente, se aleja de esta subjetividad y busca derivar las ponderaciones de manera objetiva y cuantitativa. En lugar de asignar pesos constantes por estación, este enfoque calcula la contribución media de cada variable

al suministro total para cada mes usando series históricas. La fracción de la oferta total aportada por la nieve, el caudal o las reservas se utiliza como peso para ese componente. Este procedimiento genera pesos distintos cada mes y garantiza que la suma de los pesos siga siendo uno. Al obtenerse directamente de los datos, las ponderaciones son menos arbitrarias y tienden a ser más equilibradas entre las variables; como resultado, el índice resultante presenta una distribución casi normal y una frecuencia reducida de valores extremos.

Las diferencias conceptuales entre ambos métodos repercuten en las propiedades del índice: el método de Colorado suele presentar mayores valores extremos y se ajusta mejor a la percepción local del suministro porque los expertos ponderan más fuertemente las variables dominantes, pero su naturaleza subjetiva puede inducir sesgos y dificultar la comparación entre cuencas. Por otro lado, el método de Oregón, al basarse en la participación relativa de cada componente, genera un índice más estable y estadísticamente robusto, aunque a veces su correlación con el suministro real es algo menor.

Los pesos estacionales deben calibrarse localmente, pero deben representar la realidad de la gestión del ciclo de cada temporada:

- √ Durante los meses de invierno es fundamental el seguimiento de las nevadas, lo que anticipa situaciones de Sequías Meteorológicas. La importancia, o peso, de esta variable aumenta a medida que pasan los meses invernales, llegando a su máximo a fines de agosto, época en la que generalmente terminan las nevadas en la alta cordillera de Mendoza.
- √ La otra variable a la que es fundamental realizar un seguimiento permanente durante el invierno, es las reservas de los embalses. Históricamente, la gestión anual de la distribución de dotaciones ha tenido dos objetivos: satisfacer de la mejor forma las demandas mensuales y llegar a fines del mes de julio con los embalses llenos.
- √ Una de las operaciones básicas de la gestión es realizar la "corta anual" de caudales en todos los sistemas de riego, la que se realiza en invierno, con dos objetivos básicos: realizar el mantenimiento anual de la infraestructura de riego en toda la cuenca y aumentar al máximo las reservas en los embalses.
- √ Este último objetivo es fundamental para iniciar la temporada de riego y mantener la entrega de agua a los cultivos a lo largo de la primavera, generalmente hasta fines de noviembre.

Se debe tener en cuenta que, aunque las nevadas de invierno sean abundantes, los caudales de primavera son bajos, debido a que no hay temperaturas en alta montaña que generen derretimiento suficiente para satisfacer las importantes demandas primaverales. Por lo tanto, durante todos estos meses, el aporte más importante para riego son las reservas de los embalses.

- √ Como ya se comentara, el Departamento General de Irrigación realiza el "Pronóstico de Escurrimientos de los Ríos de Mendoza" a fines de setiembre, dado que para esta operación es indispensable contar con la información del total de la nieve precipitada, la que se obtiene generalmente durante la primera quincena de setiembre. Este es el motivo por el cual las temporadas de gestión y planificación anual son del 01 de octubre de un año hasta el 30 de setiembre del siguiente.

Hay una versión revisada del SWSI que propone utilizar como un único parámetro probabilístico la no–excedencia del volumen total esperado (caudal pronosticado + reservas) y adopta la fórmula simplificada:

$$IOAS_{pron} = \frac{F^{E+Q_{pron}} - 50}{12}$$

- √ Por último, a partir de la publicación del pronóstico, el seguimiento de los caudales de los ríos se hace más importante, ya que se deben evaluar y realizar los ajustes necesarios para la operación diaria de los embalses.

Por lo tanto, el uso del IOAS presenta varias ventajas:

- √ Incorporación de los principales controles hidrológicos. El caudal de los ríos mendocinos depende de la cantidad de nieve acumulada en la cordillera, del manejo de los embalses y de la eficiencia de los sistemas de riego. El IOAS integra estas tres variables, otorgando una visión integral que se ajusta mejor a la realidad local que los índices basados únicamente en precipitaciones.
- √ Flexibilidad temporal y espacial. El IOAS puede calcularse para cada cuenca (Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel) utilizando sus propias series de nieve, caudal y reservas. Los pesos mensuales permiten adaptarse a las particularidades de cada cuenca y a los ciclos hidrológicos.
- √ Capacidad de anticipación. Al emplear equivalentes de nieve y reservas, el índice actúa como un indicador tempranero de la oferta futura. Los valores negativos tempranos (mayo–junio) permiten anticipar temporadas de sequía y planificar la asignación de agua para cultivo y abastecimiento urbano.
- √ Integración con sistemas de alerta. El IOAS se puede integrar en sistemas de información geográfica y plataformas web para proporcionar alertas automáticas a agricultores y organismos públicos. Además, la estandarización facilita la comparación interanual y la comunicación de la severidad de la sequía.

Entre los retos para su aplicación se encuentra la necesidad de calibrar periódicamente los pesos para reflejar cambios en la gestión (nuevas presas, pérdidas de capacidad

de embalse, mejoras en la infraestructura de canales, etc.) y el riesgo de subjetividad al asignar pesos si no se utiliza un método objetivo. No obstante, el IOAS constituye una herramienta robusta y adaptable para gestionar el recurso hídrico en Mendoza.

1.7 CONCLUSIONES

La consolidación del Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana (SMAT-PEGRIS) representa el pilar operativo indispensable para la transición definitiva de un modelo de gestión de crisis reactiva hacia uno de gestión integral del riesgo proactiva en la provincia de Mendoza.

La justificación técnica de los índices seleccionados, tales como el Índice de Nieve Estándar (INE), el Índice de Derrame Estándar (IDE) y el Índice de Reservas Estándar (IRE), radica en su capacidad para capturar la singularidad hidrológica regional, donde la dependencia superior al 95% de la precipitación nival exige herramientas que traduzcan la escasez meteorológica en disponibilidad hídrica real y operativa.

Al adoptar la rigurosidad metodológica del Índice de Precipitación Estándar (SPI) recomendada por la Organización Meteorológica Mundial, este sistema garantiza una normalización estadística que permite comparar con objetividad científica la severidad de los eventos actuales frente a los registros históricos, dotando así a la administración de una base técnica irrefutable para la toma de decisiones críticas.

La importancia estratégica del SMAT dentro del Plan Especial de Gestión del Riesgo de Sequía (PEGRIS) trasciende la mera vigilancia, convirtiéndose en el mecanismo activador de fases de gravedad progresiva que otorgan cobertura jurídica y técnica a medidas de gestión extraordinarias y proporcionales.

Esta arquitectura permite armonizar el diagnóstico cuantitativo con un lenguaje de comunicación transparente, basado en categorías y colores, que facilita la coordinación interinstitucional y legitima las acciones de mitigación ante los diversos usuarios del agua. De este modo, el monitoreo constante no solo identifica el inicio y la magnitud de la sequía, sino que integra la evaluación de vulnerabilidades sectoriales, asegurando que la prioridad absoluta del abastecimiento humano se mantenga inalterable frente a escenarios de escasez extrema.

La implementación futura a nivel de cuenca, a través de los planes operativos específicos (PAGRIS), se enfocará en un proceso de mejora continua y aprendizaje pos-sequía que ajuste los umbrales de decisión a la nueva normalidad climática del siglo XXI.

En conclusión, este sistema se posiciona como el instrumento fundamental para fortalecer la resiliencia hídrica de Mendoza, garantizando que la gestión del recurso sea dinámica, participativa y estrictamente basada en el conocimiento del riesgo para proteger el desarrollo sostenible de la provincia.

1.8 BIBLIOGRAFÍA

Abramowitz, M., y Stegun, I. A. (1965). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. National Bureau of Standards.

Alley, W. M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology*, *23*, 1100–1109.

Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., y Kustas, W. P. (2011). Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *Journal of Climate*, *24*(8), 2025–2044.

Bergman, K. H., Sabol, P., y Miskus, D. (1988). Experimental Indices for Monitoring Global Drought Conditions. En *Proceedings of the 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*. Department of Commerce.

Bhuiyan, C. (2004). Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India. Proceedings of the 20th ISPRS Conference.

Byun, H. R., y Wilhite, D. A. (1996). Daily quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, *5*, 1181–1201.

Departamento General de Irrigación. (2025). Plan Especial de Gestión del Riesgo de Sequía (PEGRIS): Provincia de Mendoza.

Edwards, D. C., y McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales* (Climatology Report 97-2). Colorado State University.

Gibbs, W. J., y Maher, J. V. (1967). *Rainfall Deciles as Drought Indicators* (Bureau of Meteorology Bulletin No. 48). Melbourne.

Gusyev, M. A., Hasegawa, A., Magome, J., Kuribayashi, D., Sawano, H., y Lee, S. (2015). *Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts*. Proceedings of the 21st International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM).

Guttman, N. B. (1998). Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, *34*(1), 113–121.

Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, *35*(2), 311–322.

Hao, Z., y AghaKouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: a multi-index parametric approach for drought analysis. *Advances in Water Resources*, *57*, 12–18.

Hayes, M. J., Svoboda, M., Wall, N., y Widhalm, M. (2011). The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *92*(4), 485–488.

Huning, L. S., y AghaKouchak, A. (2020). *Standardized Snow Water Equivalent Index (SWEI)*. Global Drought Monitor.

Keyantash, J. A., y Dracup, J. A. (2004). An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, *40*(W09304).

Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, *15*(11), 91–100.

McKee, T. B., Doesken, N. J., y Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society.

Meyer, S. J., Hubbard, K. G., y Wilhite, D. A. (1993). A Crop-specific Drought Index for corn. I. Model development and validation. *Agronomy Journal*, *85*, 388–395.

Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación* (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood; OMM-N° 1090).

Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía* (M. Svoboda y B. A. Fuchs; OMM-N° 1173). Programa de gestión integrada de sequías.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought* (Research Paper No. 45). US Weather Bureau.

Shafer, B. A., y Dezman, L. E. (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. Proceedings of the Western Snow Conference.

Staudinger, M., Stahl, K., y Seibert, J. (2014). A drought index accounting for snow. *Water Resources Research*, *50*, 7861–7872.

Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., y Stephens, S. (2002). The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *83*(8), 1181–1190.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696–1718.

Wells, N., Goddard, S., y Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, *17*, 2335–2351.

Wilhite, D. A., y Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, *10*, 111–120.

2 CAMBIO CLIMÁTICO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA EN MENDOZA

Dr. Juan A. Rivera[3]

2.1 RESUMEN

Este capítulo realiza una síntesis del cambio climático observado y proyectado a lo largo de la Cordillera de los Andes de Mendoza, en base al análisis de bases de datos de temperatura y precipitación, mediciones de caudal, reconstrucciones climáticas y simulaciones de modelos climáticos globales. En las últimas cinco décadas se observó un incremento en la tasa de calentamiento regional, señal atribuible al cambio climático asociado a las actividades humanas. Las precipitaciones presentan gran variabilidad interanual, aunque en los últimos años emerge una tendencia hacia condiciones deficitarias que no tiene precedentes en más de un siglo de registros de precipitaciones y caudales. Esta señal emerge además en reconstrucciones climáticas que abarcan los últimos 600 años, lo cual pone de manifiesto lo inusual de la sequía reciente sobre la región. Se proyecta una continuidad de los cambios observados para lo que resta del siglo XXI, con un calentamiento generalizado sobre la Cordillera de los Andes y una reducción en las precipitaciones, lo cual se espera que genere impactos negativos en la criósfera y en la disponibilidad de recursos hídricos regionales.

3 Licenciado en Ciencias de la Atmósfera y Doctor en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos por la Universidad de Buenos Aires. Investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas con lugar de trabajo en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Miembro del Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IFAECI)–IRL 3351–CNRS-CONICET-IRD-UBA, Buenos Aires, Argentina.

2.2 INTRODUCCIÓN

El incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de las actividades humanas generó cambios observados en la atmósfera, los océanos, la criósfera, y la biósfera, que proporcionan pruebas inequívocas del calentamiento global (IPCC, 2021). Durante las últimas décadas, indicadores clave del sistema climático se encuentran en niveles nunca vistos en siglos o milenios, y están cambiando a un ritmo sin precedentes en al menos los últimos 2000 años (Gulev et al., 2021). Para el promedio de la década 2015-2024, el calentamiento observado en relación con el período preindustrial (1850-1900) fue de 1,24 [1,11 a 1,35] °C, de los cuales 1,22 [1,0 a 1,5] °C son atribuibles a las actividades humanas (Forster et al., 2025).

El aumento de la temperatura media global está acompañado por un incremento de los eventos extremos cálidos, como las olas de calor, y una disminución de los extremos fríos, como las heladas (Seneviratne et al., 2021).

En tanto, los cambios en las precipitaciones presentan un patrón espacial de cambio más heterogéneo, siendo que en algunas regiones se documentaron incrementos y en otras disminuciones. No obstante, existe evidencia que señala que la precipitación media global sobre regiones continentales probablemente registró aumentos desde 1950, con una tasa de aumento más rápida desde la década de 1980 (IPCC, 2021). El patrón de cambios globales en las precipitaciones probablemente sea atribuible a las actividades humanas.

Este incremento reciente en las precipitaciones está en línea con una intensificación del ciclo hidrológico global, evidente en varias componentes como el vapor de agua, la humedad atmosférica y la evaporación (Gulev et al., 2021). Asimismo, en diversas regiones del mundo se ha identificado un incremento en los eventos de precipitaciones extremas (Robinson et al., 2021).

A nivel regional, la respuesta hidroclimática a estos cambios no es uniforme: mientras que el incremento de temperaturas presenta una señal robusta y espacialmente coherente, los cambios en precipitación muestran mayor heterogeneidad según latitud, altitud y dependencia de la criósfera. Esto requiere un abordaje específico para definir vulnerabilidades y diseñar medidas de adaptación efectivas.

En la Cordillera de los Andes, diversos estudios documentaron una reducción en las precipitaciones invernales en el rango de latitudes que abarca las regiones de Cuyo y el norte de la Patagonia (Zazulie et al., 2017; Rivera et al., 2020; 2024). En relación a las temperaturas, el cambio reciente presenta un patrón más homogéneo a lo largo de la Cordillera de los Andes, con aumentos generalizados en la temperatura media y en las temperaturas máximas y mínimas (Pabón-Caicedo et al., 2020).

El impacto conjunto de los cambios observados en la temperatura y la precipitación a lo largo de la Cordillera de los Andes generó cambios en la criósfera regional, con una reducción en la extensión y espesor de la capa de nieve, así como en la masa de hielo y la posición del frente glaciar (Masiokas et al., 2020). Esto genera una reducción significativa

en los caudales superficiales, así como también cambios en su estacionalidad, evidentes en los períodos de ocurrencia de máximos y mínimos (Lauro et al., 2025).

En cuanto a las proyecciones futuras, todos los estudios científicos proyectan una continuidad en los cambios observados. Los incrementos proyectados en las temperaturas presentan una fuerte dependencia del horizonte temporal considerado y del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero, con los mayores incrementos proyectados para fin de siglo y bajo los escenarios más pesimistas (Zazulie et al., 2018; Pabón-Caicedo et al., 2020; Almazroui et al., 2021).

En particular, sobre la Cordillera de los Andes se observa una clara dependencia del calentamiento con la elevación, lo cual posee un impacto directo en la criósfera regional (Marianetti et al., 2026). Asimismo, estudios basados en simulaciones globales y regionales muestran reducciones proyectadas en las precipitaciones en la zona extratropical andina (Mindlin et al., 2020; Almazroui et al., 2021; Villamayor et al., 2021; Rivera et al., 2024).

La Cordillera de los Andes de Mendoza constituye una región de vital importancia hidroclimática, ecológica y socioeconómica para la provincia. La Cordillera actúa como fuente de recursos hídricos para los oasis irrigados, que concentran las actividades agrícolas y los principales centros urbanos. La sensibilidad de estos recursos al calentamiento global y a las alteraciones en los regímenes de precipitación coloca a la provincia de Mendoza en una posición de alta vulnerabilidad frente a las variaciones climáticas observadas en las últimas décadas y a las proyecciones climáticas futuras. Este capítulo presenta una síntesis de los cambios observados y proyectados en el clima de la provincia de Mendoza, con foco en la Cordillera de los Andes, región fuente de agua para el sostenimiento de las actividades socio-productivas.

2.3 CAMBIO CLIMÁTICO OBSERVADO

Antes de comenzar la descripción de los cambios observados en el clima de Mendoza, es conveniente hacer una breve reseña de los mecanismos de circulación atmosférica que controlan el clima regional.

La Cordillera de los Andes genera importantes diferencias climáticas entre sus vertientes oriental y occidental, las cuales se reflejan en gran medida en los contrastes entre la vegetación, la cobertura de hielo y nieve y los patrones de precipitación (Viale et al., 2019). En las porciones más elevadas y zonas aledañas a la Cordillera de los Andes, los mayores acumulados de precipitación se observan durante el semestre frío, los cuales se registran principalmente en forma de nieve. Esto se da en respuesta al desplazamiento estacional del sistema de alta presión semipermanente ubicado en latitudes medias del Océano Pacífico Sur y la llegada de masas de aire húmedo que interactúan con la topografía y generan un marcado gradiente de precipitación en sentido oeste-este (Garreaud et al., 2009).

La Cordillera de los Andes presenta una reducción en sus mayores elevaciones de norte a sur, lo cual permite que esta barrera de paso a mayores aportes de humedad en el sur provincial, lo cual genera mayores acumulados de precipitación en esta región en comparación con el extremo norte (Rivera et al., 2018). Por otro lado, en las regiones de menores elevaciones al este de la Cordillera de los Andes, el ciclo anual de las precipitaciones muestra mayores acumulados en los meses de verano, los cuales se asocian principalmente a la ocurrencia de tormentas convectivas (Viale et al., 2019). Estos procesos convectivos se ven favorecidos por una mayor temperatura estacional y aportes de humedad provenientes del Océano Atlántico y desde el centro del continente sudamericano (Hoke et al., 2013).

La región cordillerana de Mendoza es la principal fuente de agua para los arroyos, ríos y acuíferos que abastecen a los oasis irrigados de la provincia, los cuales constituyen el sistema productivo socioeconómico más importante del oeste de Argentina (Lana et al., 2021). Con lo cual, el foco para el análisis del cambio climático y su incidencia en la disponibilidad hídrica regional se pone en las variaciones hidroclimáticas a lo largo de la Cordillera de los Andes.

Para cuantificar los cambios en el clima regional, son necesarias observaciones hidrometeorológicas de largo plazo, las cuales no abundan en regiones de topografía compleja. Por ejemplo, de acuerdo a la evaluación realizada por Shahgedanova et al. (2021), del total de 27467 estaciones meteorológicas pertenecientes a la base de datos global GHCNv4, solo 1328 (4,8%) están situadas por encima de los 2000 metros de altura y 211 (0,8%) se ubican por encima de los 3000 metros.

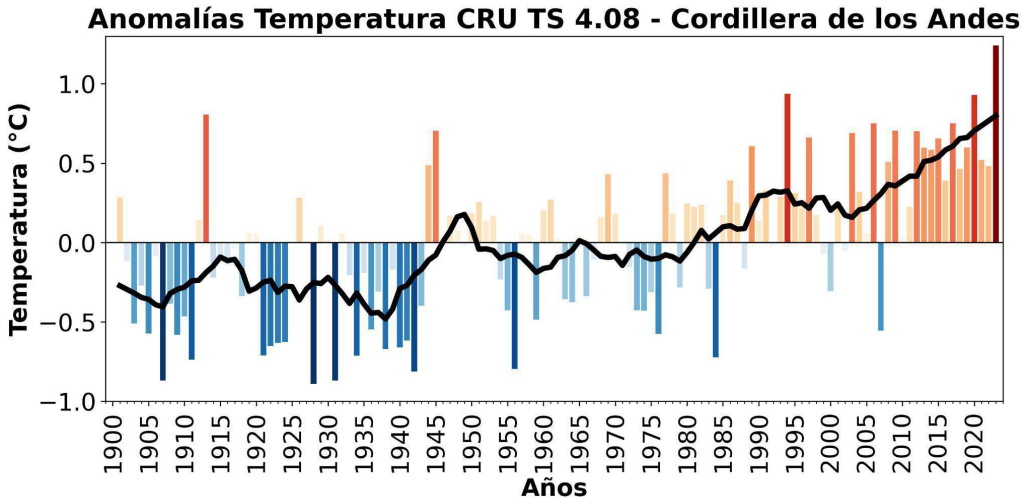
Esta falta de información también se evidencia a lo largo de la Cordillera de los Andes de Mendoza, región en la cual los registros instrumentales no son suficientes tanto desde el punto de vista espacial y temporal, y presentan vacíos en sus series temporales y errores que deben evaluarse antes de realizar cualquier estudio climático. Con lo cual, para la cuantificación del cambio climático observado en la temperatura y la precipitación en la región se utilizará la base Climatic Research Unit Time Series versión 4.08 (CRU TS 4.08, Harris et al., 2020). Esta base de datos se construye a partir de la interpolación de anomalías climáticas mensuales a partir de amplias redes de observaciones de estaciones meteorológicas, cuyos registros en su mayoría se encuentran homogeneizados. La base CRU TS 4.08 abarca el período desde 1901 hasta 2023, con una resolución espacial de 0,5° (aproximadamente 50 km) de latitud y longitud.

El Cuadro 2.1 muestra la evolución temporal de las anomalías de temperatura CRU TS 4.08 respecto al período 1901-2023 para un dominio que abarca la Cordillera de los Andes de Mendoza. Se observa un predominio de anomalías negativas en la temperatura regional durante la primera mitad del siglo XX, seguido por anomalías térmicas de signo variable hasta fines de la década de 1970, período a partir del cual se observa un marcado incremento en las temperaturas regionales. Es destacable el predominio de anomalías positivas de temperatura en las últimas cuatro décadas, con 36 años de los últimos

44 años presentando temperaturas más cálidas que el promedio de largo plazo. En particular, se destaca la anomalía registrada en el año 2023, superior a 1,0° C, muy probablemente superada en 2024, año que se convirtió en el más cálido del período instrumental (World Meteorological Organization [WMO], 2025).

Cuadro 2.1

Evolución temporal de las anomalías de temperatura media anual correspondientes a la base de datos CRU TS 4.08 para una región que comprende la Cordillera de los Andes de Mendoza. Las barras en tonos rojos (azules) indican años con anomalías positivas (negativas) de temperatura, cuyas mayores magnitudes absolutas se asocian a colores más intensos. La línea negra representa la variabilidad decadal a partir de un promedio móvil de 11 años. Período 1901-2023.



Fuente: Elaboración propia

El patrón de incremento en las temperaturas regionales está en línea con el calentamiento global provocado por las actividades humanas, que hizo que cada una de las últimas cuatro décadas haya sido más cálida que cualquier otra década anterior desde 1850 (IPCC, 2021), con un nivel de calentamiento reciente (2015-2024) de 1,24°C por encima de los niveles preindustriales (Forster et al., 2025). En las regiones montañosas del planeta, numerosos estudios muestran la existencia de un calentamiento dependiente de la altitud (Byrne et al., 2024; Pepin et al., 2015), lo que hace que estas regiones experimenten cambios de temperatura más rápidos que las de menor altitud.

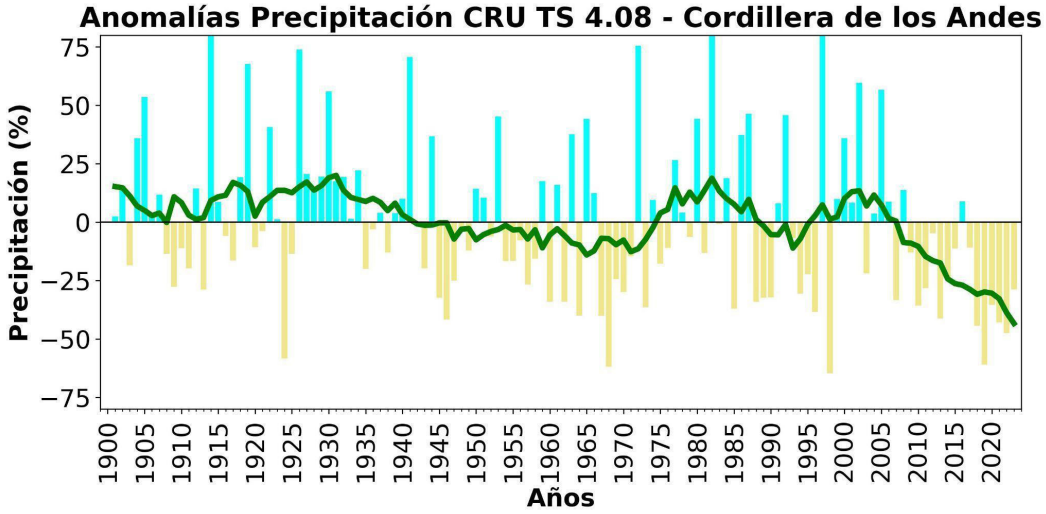
Este calentamiento dependiente de la altitud puede tener importantes implicancias para los ecosistemas andinos, los diferentes componentes de la criósfera, los regímenes hidrológicos y la biodiversidad (Pabón-Caicedo et al., 2020). Según Rivera et al. (2020),

el umbral de calentamiento definido en el Acuerdo de París (1,5°C respecto a los niveles preindustriales) ya fue alcanzado en la Cordillera de los Andes de Mendoza, mientras que en regiones aledañas de baja altura se espera que se alcance entre 2035 y 2038.

Los cambios observados en la precipitación presentan una gran variabilidad interanual, lo que hace que se alternen años con excesos de precipitación con años de déficit (Cuadro 2.2). Estas variaciones son además moduladas por oscilaciones decadales y multidecadales, que evidencian un predominio de años relativamente húmedos desde principios del siglo XX hasta 1940, seguidos por una mayor frecuencia de años secos hasta mediados de la década de 1970. Luego se alternan períodos multianuales de excesos y déficits de precipitación hasta el año 2010, a partir del cual se registra una marcada reducción en las precipitaciones regionales.

Cuadro 2.2

Evolución temporal de las anomalías porcentuales de precipitación acumulada anual correspondientes a la base de datos CRU TS 4.08 para una región que comprende la Cordillera de los Andes de Mendoza. Las barras celestes (naranjas) indican años con anomalías positivas (negativas) de precipitación. La línea verde representa la variabilidad decadal a partir de un promedio móvil de 11 años. Período 1901-2023.



Fuente: Elaboración propia

En particular, se destaca que el promedio decadal de las anomalías de precipitación muestra los valores más bajos de los últimos 124 años durante el período de sequía reciente, lo cual da cuenta de lo inusual del déficit en las precipitaciones regionales. Esta reducción significativa en las precipitaciones también es evidente a lo largo de la Cordillera de los Andes de la Patagonia Norte (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

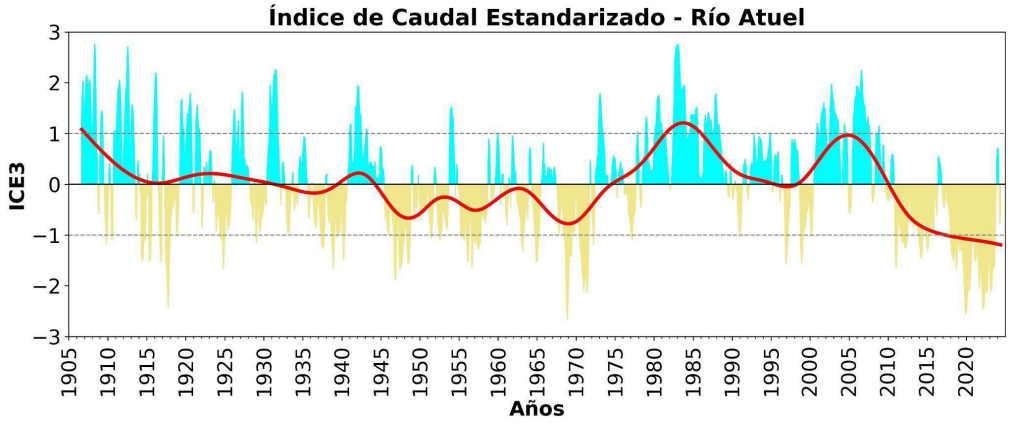
Diversos mecanismos dinámicos explican la continuidad temporal del déficit en las precipitaciones en la región: a) una predominancia de la fase fría de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), en línea con una mayor frecuencia de anomalías negativas en la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Tropical (Rivera et al., 2017; Caragunis et al., 2020; Rivera & Gulizia, 2025); b) una tendencia de largo plazo a un fortalecimiento y desplazamiento hacia el sur del Anticiclón semipermanente del Océano Pacífico Sur, junto con un fortalecimiento del sistema de baja presión ubicado en la región del Mar de Amundsen-Bellinghausen (Caragunis et al., 2020; Rivera & Arnould, 2020; Rivera & Gulizia, 2025), lo cual genera un incremento en la intensidad del cinturón de vientos oestes de latitudes medias; y c) una tendencia hacia un calentamiento en las aguas del Océano Pacífico al este de Nueva Zelanda (Rivera et al., 2017).

El déficit reciente en las precipitaciones a lo largo de la Cordillera de los Andes impactó en los caudales de los principales ríos andinos, resultando en la ocurrencia de una sequía hidrológica multianual que afectó la disponibilidad hídrica para las actividades socioeconómicas regionales. Para la cuantificación de la variabilidad hidrológica regional se utilizaron los registros del río Atuel, usualmente seleccionados como representativos del régimen hidrológico de la región de Cuyo (Araneo & Villalba, 2015), los cuales proporcionan la serie temporal más extensa de la región con mediciones ininterrumpidas desde el año 1906. Estos registros de caudal se analizaron a partir de uno de los índices hidrológicos más utilizados por la comunidad científica y los organismos de gestión del agua, el índice de caudal estandarizado (ICE, Vicente-Serrano et al., 2012), el cual permite cuantificar la cantidad de desviaciones estándar que el caudal a nivel mensual se aparta respecto del promedio a largo plazo en un período determinado. El Cuadro 2.3 muestra la evolución temporal del ICE para el río Atuel en ventana temporal de 3 meses (ICE3), procedimiento que suaviza la variabilidad hidrológica de muy alta frecuencia y es útil para detectar fluctuaciones hidrológicas relevantes (Rivera et al., 2021). El Cuadro incluye además la variabilidad multidecadal de los caudales estimada a partir del ensamble de la descomposición empírica en modos (Wu & Huang, 2009), método que permite separar los distintos modos de variabilidad de una serie temporal y agruparlos de acuerdo a sus periodicidades dominantes. Se observa que la señal multidecadal en los caudales se asemeja con lo observado para las precipitaciones, con una marcada señal deficitaria a partir del año 2010. En este período, el 92% de los meses presentó condiciones de sequía hidrológica en distintos niveles de severidad. Asimismo, la señal multidecadal presenta los valores más bajos de los últimos 119 años, lo cual da cuenta de lo inusual de este evento en un contexto centenario.

Las reconstrucciones climáticas permiten poner en contexto multicentenario la magnitud de los cambios recientes obtenidos a partir de observaciones instrumentales. Estas reconstrucciones se valen de registros denominados "proxies", indicadores indirectos del clima pasado, como anillos de árboles, testigos de hielo o sedimentos. A partir de estos indicadores pueden inferirse las condiciones de la temperatura o la humedad en períodos previos al siglo XX, abarcando varios siglos a milenios dependiendo del indicador considerado.

Cuadro 2.3

Índice de caudal estandarizado en ventana de 3 meses (ICE3) obtenido a partir de los registros históricos de caudal del río Atuel para el período comprendido entre los años hidrológicos 1906/07 y 2023/24. Los sombreados celestes (naranjas) indican años con anomalías positivas (negativas) de caudal. Se muestra además la variación decadal del ICE3 (línea roja).



Fuente: Elaboración propia

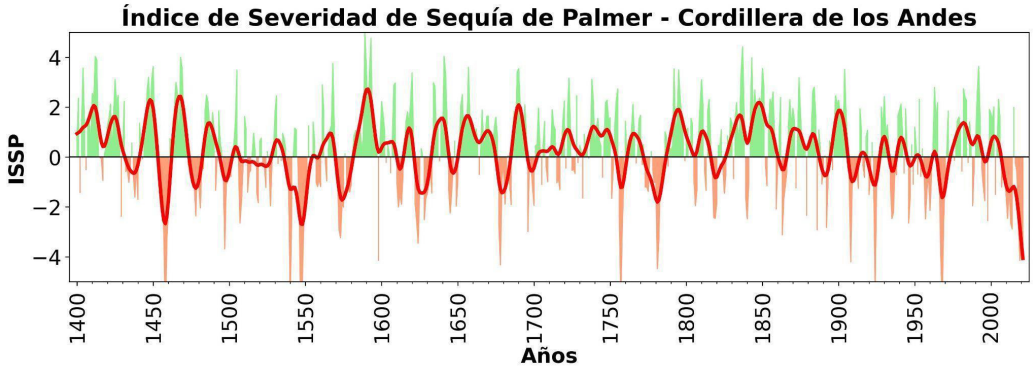
Mediante la evaluación de una amplia variedad de registros proxies, incluyendo evidencia ecológica, geoquímica y biofísica procedente de archivos tanto marinos como terrestres, el último informe de evaluación del IPCC indica que, a nivel global, la década 2011-2020 fue más cálida que cualquier otra década de los últimos 125.000 años (IPCC, 2021). Son escasas las reconstrucciones de temperatura que consideran registros proxies a lo largo de la Cordillera de los Andes de Mendoza. La reconstrucción realizada por de Jong et al. (2013) para la Laguna Chepical, ubicada en Chile central, muestra que el período 1940-1970 fue el más cálido de los últimos 3000 años, período que es relativamente frío tomando como referencia las temperaturas de los últimos 124 años (Cuadro 2.1). Con lo cual, es probable que el calentamiento reciente sobre la región no tenga precedentes en el contexto de los últimos milenios. En el caso de las precipitaciones, existen limitaciones en la disponibilidad y calidad de los registros proxies para realizar una reconstrucción multimilenio a lo largo de la Cordillera de los Andes. No obstante, estas reconstrucciones climáticas pueden encontrarse en escalas centenarias, principalmente a partir del uso de ancho de los anillos de árboles. En ese sentido, el Atlas de Sequías de Sudamérica (https://sada.cr2.cl/, Morales et al., 2020) utilizó decenas de miles de árboles pertenecientes a 12 especies para reconstruir la disponibilidad hídrica en el suelo en el período 1400-2021, a partir de la cuantificación del índice de severidad de sequía de Palmer (ISSP).

El Cuadro 2.4 muestra la evolución temporal del ISSP en una región que comprende la Cordillera de los Andes de Mendoza. Se observa una alternancia de períodos húmedos

y secos, sin tendencias de largo plazo evidentes. Si se considera la variabilidad decadal del índice, estimada a partir del cálculo de un spline cúbico de 13 años, se observa que la severidad del período de sequía reciente no tiene precedentes en los últimos 600 años. Con lo cual, esta tendencia emergente hacia condiciones más secas es identificable en distintas componentes del ciclo hidrológico regional y su magnitud es inusual en el contexto multidecadal a multicentenario.

Cuadro 2.4

Índice de severidad de sequía de Palmer (ISSP) obtenido a partir de la reconstrucción disponible en el Atlas de Sequías de Sudamérica para el período comprendido entre los años 1400 y 2021. Los sombreados verdes (marrones) indican años con exceso de humedad (condiciones de sequía). Se muestra además la variación decadal del ISSP a partir de un spline cúbico de 13 años (línea roja).



Fuente: Elaboración propia

2.4 PROYECCIONES FUTURAS

Los modelos climáticos son una representación numérica del sistema atmósfera - océano - hielo marino basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y los procesos de retroalimentación, los cuales se utilizan para las previsiones meteorológicas, la predicción estacional a decenal y las proyecciones climáticas futuras.

Diversas instituciones desarrollan modelos climáticos globales, los cuales presentan una resolución espacial típica de entre 100 a 250 km y son útiles para comprender mejor el cambio climático pasado, presente y futuro derivado de la variabilidad natural o en respuesta a los cambios en los forzantes radiativos. Para coordinar los experimentos de simulación climática, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés), auspiciado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas

(WCRP por sus siglas en inglés), elabora lineamientos que hacen que las simulaciones entre diferentes modelos climáticos globales sean comparables. Los modelos de la sexta fase de CMIP (CMIP6) fueron utilizados para la elaboración del último informe de evaluación del IPCC.

Para la elaboración de las proyecciones futuras, los modelos consideran diversas trayectorias de emisiones de gases de invernadero, conocidas como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés). Estas trayectorias describen diversos futuros de desarrollo socioeconómico y representan, a partir de cinco narrativas distintas, cómo podría evolucionar el mundo en las próximas décadas y qué desafíos suponen estos cambios para la mitigación y la adaptación (O'Neill et al., 2016).

Las simulaciones del conjunto CMIP6 están disponibles en un Atlas Interactivo que permite obtener información útil para la cuantificación del cambio climático proyectado en diversas regiones del planeta (https://interactive-atlas.ipcc.ch/). Para el análisis de las proyecciones climáticas futuras se consideraron las simulaciones sobre las áreas montañosas de la región Sudoeste de Sudamérica, la cual abarca buena parte de la Cordillera de los Andes de Argentina y Chile (Iturbide et al., 2020). El ensamble multimodelo para la región comprende 34 simulaciones de temperatura y 33 simulaciones de precipitación, las cuales fueron forzadas por el escenario SSP5-8.5.

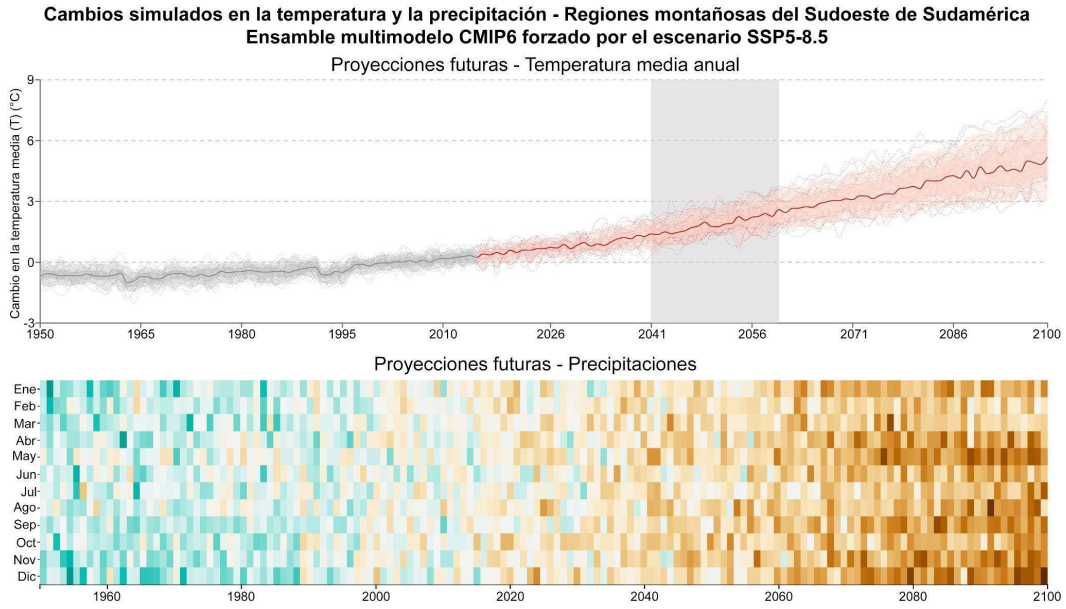
Este escenario sigue el extremo superior de la gama de escenarios futuros disponibles, lo cual responde a elevado crecimiento poblacional, altas emisiones de gases de efecto invernadero y ausencia de políticas de mitigación. Además, es el único escenario con emisiones lo suficientemente altas como para producir un forzamiento radiativo de 8,5 W/m2 en 2100, lo cual generaría un calentamiento global respecto a los niveles preindustriales cercano a los 5°C hacia fines del siglo XXI, con un rápido incremento en la concentración de dióxido de carbono (O'Neill et al., 2016).

El Cuadro 2.5 muestra la evolución temporal de las anomalías de temperatura regional obtenidas respecto al período de referencia 1995-2014, para parte del período histórico (1950-2014) y futuro (2014-2100). La línea continua representa el ensamble multimodelo y las simulaciones individuales se representan en líneas de trazos, lo cual permite estimar la incertidumbre en las simulaciones. Las anomalías de temperatura regional muestran valores mayormente positivos desde la década de 2000, los cuales superan los 4°C de calentamiento hacia fin del siglo XXI de acuerdo con el ensamble multimodelo, aunque con simulaciones individuales que podrían superar los 6°C de calentamiento respecto al período de referencia.

En el futuro de mediano plazo, identificado por el bloque sombreado entre los años 2040 y 2060, se proyecta un incremento sostenido en las temperaturas como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero, que alcanzaría los 2,2°C respecto al período de referencia. Esto representa una continuidad a futuro de la señal de calentamiento observado a lo largo del último siglo (Cuadro 2.1), lo cual estará acompañado por un incremento en la frecuencia y severidad de extremos cálidos de temperatura,

Cuadro 2.5

Cambios proyectados en el clima de la región correspondiente a las áreas montañosas del Sudoeste de Sudamérica, respecto al período de referencia 1995-2014, en base a un ensamble multimodelo del conjunto CMIP6 forzado por el escenario de más altas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP5-8.5).



Fuente: Elaboración propia

como olas de calor y días extremadamente calurosos (Arias et al., 2024). En cuanto a las precipitaciones, se observa una reducción generalizada proyectada a lo largo del siglo XXI (Cuadro 2.5). En particular, estas reducciones se exacerban a partir de la segunda mitad del siglo, lo cual compromete la disponibilidad de recursos hídricos regionales.

Los extremos de precipitación siguen la tendencia en los valores medios de la variable, con una reducción proyectada para índices extremos, como los días en los que la precipitación supera los 20 mm, e incrementos en la cantidad de días secos (Arias et al., 2024). Con lo cual, una proporción de la reducción media de la precipitación se explica por una reducción en la ocurrencia de eventos extremos y un incremento en la longitud de las rachas secas. Asimismo, el incremento proyectado en la temperatura media regional generará una mayor proporción de lluvia en detrimento de la acumulación de nieve sobre las mayores elevaciones de la Cordillera de los Andes de Mendoza, lo cual tendrá implicancias sobre el escurrimiento superficial de los principales ríos y la evolución futura de los glaciares en la región (Toum et al., 2023).

Las proyecciones del ISSP para la región central de Chile indican que existe un alto grado de confianza en que el cambio climático generará una reducción en la humedad del suelo que está fuera del rango de valores observados y reconstruidos a lo largo del último milenio (Douville et al., 2021). Dado que los procesos dinámicos que afectan la disponibilidad hídrica en esa región son los mismos que actúan sobre las nacientes de los ríos andinos de Cuyo, se proyecta que la tendencia reciente en las precipitaciones (Cuadro 2.2 y Cuadro 2.4) continuará a lo largo del siglo XXI como consecuencia del cambio climático.

El aumento de las temperaturas, factor que provoca un incremento en la demanda por evaporación, también es un factor que contribuye a incrementar la señal de sequía proyectada a futuro en la Cordillera de los Andes de Mendoza. Cuando se combinan los incrementos proyectados en la temperatura regional junto con las reducciones en la precipitación y esas simulaciones se usan como insumo para forzar un modelo hidrológico calibrado a nivel cuenca, se obtienen importantes reducciones proyectadas en el caudal futuro de los ríos de Cuyo. Estas reducciones oscilan entre -20% para el río Tunuyán y -45% para el río Diamante, de acuerdo al escenario SSP5-8.5 y el horizonte temporal 2046-2055 (Toum et al., 2023).

Cabe destacar que los cambios proyectados en el clima están sujetos a incertidumbres que dependen de múltiples factores, como por ejemplo la incertidumbre asociada a las emisiones futuras; la incertidumbre asociada a la respuesta del clima a esas emisiones, que depende de los procesos que representan cada uno de los modelos climáticos usados para simular el clima futuro; y la variabilidad interna del sistema climático (Hawkins & Sutton, 2009). Los escenarios tienden a contribuir a la incertidumbre en las proyecciones de temperatura, mientras que las proyecciones de precipitación están dominadas por la incertidumbre de cada modelo (Wu et al., 2022). En la última década hubo una reducción de la incertidumbre en los escenarios de emisiones, una mejora en la selección de modelos climáticos y la cuantificación de su sensibilidad climática, y una mayor certeza de que las proyecciones futuras siguen el comportamiento observado en el clima (Gillett, 2024).

No obstante, los modelos climáticos globales todavía presentan algunas dificultades para capturar adecuadamente las características climatológicas regionales y locales, particularmente en regiones con topografía compleja como la Cordillera de los Andes (Almazroui et al., 2021). El uso de modelos climáticos regionales, como aquellos pertenecientes al conjunto Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) del WCRP, ha mostrado un valor agregado para la representación climática en el sur de Sudamérica (Falco et al., 2019). Sin embargo, todavía existen desafíos para la correcta representación del clima y su evolución futura a lo largo de la Cordillera de los Andes por parte de los modelos climáticos regionales (Marianetti et al., 2026).

2.5 CONCLUSIONES

La Cordillera de los Andes de Mendoza, región fuente de los recursos hídricos provinciales, evidencia un proceso de calentamiento de largo plazo que incrementó su magnitud desde fines de la década de 1970, en respuesta al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero como consecuencia de las actividades humanas. Es destacable el predominio de anomalías positivas de temperatura en las últimas cuatro décadas, con 36 años de los últimos 44 años presentando temperaturas más cálidas que el promedio de largo plazo. Las precipitaciones presentan una marcada variabilidad interanual, con oscilaciones multidecadales que representan una amplitud del orden de ±25% de las anomalías a lo largo del siglo XX. Sin embargo, en los últimos años emergió una tendencia negativa en las precipitaciones que impactó significativamente en la acumulación de nieve y, consecuentemente, en la disponibilidad de agua a escala regional. El promedio decadal de este déficit en las precipitaciones no tiene precedentes en los últimos 124 años. La variabilidad de los caudales regionales, evaluados a partir de la serie de caudales mensuales del río Atuel, la más extensa (1906-2024) de la región de Cuyo, está en línea con lo observado para las precipitaciones.

La señal de sequía meteorológica reciente se propagó a lo largo del ciclo hidrológico regional, generando condiciones de sequía hidrológica que no tienen precedentes en términos de magnitud y duración. Desde el año 2010, el 92% de los meses presenta condiciones de sequía hidrológica en distintos niveles de severidad, y la variabilidad decadal del caudal del río Atuel registra los valores más bajos de los últimos119 años. Al analizar el contexto multicentenario a partir de reconstrucciones climáticas, la señal de déficit reciente emerge en la variabilidad decadal de la disponibilidad hídrica en el suelo, cuyos valores son los más bajos en los últimos 600 años. Con lo cual, el contexto climático reciente presenta una continuidad de anomalías positivas de temperatura y de anomalías negativas de precipitación, que generan impactos en la criósfera regional a partir de una reducción en la acumulación de nieve que impacta en el balance de masa glaciar y en la generación caudal superficial.

Las proyecciones climáticas futuras indican una continuidad de las señales de cambio observadas en la temperatura y la precipitación, con aumentos en la temperatura a lo largo de la Cordillera de los Andes de Mendoza que superarían los 4°C a fin del siglo XXI y reducciones generalizadas en las precipitaciones en lo que resta del siglo. Los cambios proyectados tendrán implicancias con relación a la cobertura y masa de los glaciares, reservas de agua estratégicas para la región, así como también en la acumulación de nieve futura y la generación de escorrentía superficial.

Estos resultados resaltan el rol fundamental de las medidas de mitigación para reducir los mayores impactos del cambio climático a escala global y regional, teniendo en cuenta que se presentaron los cambios proyectados utilizando el escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, es fundamental avanzar en la comprensión de los riesgos hidroclimáticos a lo largo de la Cordillera de los Andes de Mendoza, no solo teniendo en cuenta los cambios proyectados en los valores medios de temperatura y precipitación sino también considerando cambios en la ocurrencia de eventos extremos. Esto será de utilidad para apoyar estrategias de adaptación frente al cambio climático proyectado en la región.

2.6 BIBLIOGRAFÍA

Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Shahzad, K., Abid, M. A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensson, A. A., Arias, P. A., Alves, L., Tippett, M. K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F. J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J. A., Ehsan, M. A., Martínez-Castro, D., Muñoz, A. G., Ali, M. A., Coppola, E., & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 models performance and projected temperature and precipitation changes over South America. Earth Systems and Environment, 5(1), 155–183. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6

Araneo, D., & Villalba, R. (2015). Variability in the annual cycle of the Río Atuel streamflows and its relationship with tropospheric circulation. International Journal of Climatology, 35(10), 2948–2967. https://doi.org/10.1002/joc.4185

Arias, P., Rivera, J., & Vera, C. (2024). Projections of climate change in South America. In Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.974

Byrne, M. P., Boos, W. R., & Hu, S. (2024). Elevation-dependent warming: Observations, models, and energetic mechanisms. Weather and Climate Dynamics, 5(3), 763–777. https://doi.org/10.5194/wcd-5-763-2024

Caragunis, J. I., Rivera, J. A., & Penalba, O. C. (2020). Characterization of hydrological droughts in central-north Argentina and their atmospheric and oceanic drivers. Climate Research, 80, 1–18. https://doi.org/10.3354/cr01593

de Jong, R., von Gunten, L., Maldonado, A., & Grosjean, M. (2013). Late Holocene summer temperatures in the central Andes reconstructed from the sediments of high-elevation Laguna Chepical, Chile (32° S). Climate of the Past, 9(5), 1921–1932. https://doi.org/10.5194/cp-9-1921-2013

Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam Mba, W., Rosenfeld, D., Tierney, J., & Zolina, O. (2021). Water cycle changes. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1055–1210). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.010

Falco, M., Carril, A. F., Menéndez, C. G., Zaninelli, P. G., & Li, L. Z. X. (2019). Assessment of CORDEX simulations over South America: Added value on seasonal climatology and resolution considerations. Climate Dynamics, 52(7–8), 4771–4786. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4412-z

Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M. D., von Schuckmann, K., Slangen, A. B. A., Szopa, S., Trewin, B., Yun, J., Gillett, N. P., Jenkins, S., Matthews, H. D., Raghavan, K., Ribes, A., Rogelj, J., Rosen, D., Zhang, X., Allen, M., Aleluia Reis, L., Andrew, R. M., Betts, R. A., Borger, A., Broersma, J. A., Burgess, S. N., Cheng, L., Friedlingstein, P., Domingues, C. M., Gambarini, M., Gasser, T., Gütschow, J., Ishii, M., Kadow, C., Kennedy, J., Killick, R. E., Krummel, P. B., Liné, A., Monselesan, D. P., Morice, C., Mühle, J., Naik, V., Peters, G. P., Pirani, A., Pongratz, J., Minx, J. C., Rigby, M., Rohde, R., Savita, A., Seneviratne, S. I., Thorne, P., Wells, C., Western, L. M., van der Werf, G. R., Wijffels, S. E., Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2025). Indicators of global climate change 2024: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. Earth System Science Data, 17(5), 2641–2680. https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R. H., & Matengo, J. (2009). Present-day South American climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281(3–4), 180–195. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032

Gillett, N. P. (2024). Halving of the uncertainty in projected warming over the past decade. npj Climate and Atmospheric Science, 7, 146. https://doi.org/10.1038/s41612-024-00693-3

Gulev, S. K., Thorne, P. W., Ahn, J., Dentener, F. J., Domingues, C. M., Gerland, S., Gong, D., Kauf-

man, D. S., Nnamchi, H. C., Quaas, J., Rivera, J. A., Sathyendranath, S., Smith, S. L., Trewin, B., von Schuckmann, K., & Vose, R. S. (2021). Changing state of the climate system. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 287–422). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.004

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Scientific Data, 7(1), 1–18. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3

Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(8), 1095–1108. https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1

Hoke, G. D., Aranibar, J. N., Viale, M., Araneo, D. C., & Llano, C. (2013). Seasonal moisture sources and the isotopic composition of precipitation, rivers, and carbonates across the Andes at 32.5–35.5°S. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14(4), 962–978. https://doi.org/10.1002/ggge.20045

IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3–32). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

Iturbide, M., Gutiérrez, J. M., Alves, L. M., Bedia, J., Cerezo-Mota, R., Cimadevilla, E., Cofiño, A. S., Di Luca, A., Faria, S. H., Gorodetskaya, I. V., Hauser, M., Herrera, S., Hennessy, K., Hewitt, H. T., Jones, R. G., Krakovska, S., Manzanas, R., Martínez-Castro, D., Narisma, G. T., Nurhati, I. S., Pinto, I., Seneviratne, S. I., van den Hurk, B., & Vera, C. S. (2020). An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: Definition and aggregated datasets. Earth System Science Data, 12(4), 2959–2970. https://doi.org/10.5194/essd-12-2959-2020

Lana, N. B., Ibañez, S., Salvi, N., Cicerone, D., & Manzano, M. (2021). First conceptual hydrogeological model of two intermountain Andean basins based on isotopes and hydrochemistry. Isotopes in Environmental and Health Studies, 57(4), 420–442. https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1905636

Lauro, C., Vich, A. I. J. & Rivera, J. A. (2025). Delays and declines in hydrological extremes in nivo-glacial rivers of Mendoza, Argentina. https://doi.org/10.1002/rvr2.70034

Marianetti, G., Rivera, J. A., & Bettolli, M. L. (2025). A dry and warm future projected by regional climate models in the Andes Mountains of Argentina. Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s41748-

Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I. & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. Frontiers in Earth Science, 8, 99. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099

Mindlin, J., Shepherd, T. G., Vera, C. S., Osman, M., Zappa, G., Lee, R. W. & Hodges K. I. (2020). Storyline description of Southern Hemisphere midlatitude circulation and precipitation response to greenhouse gas forcing. Climate Dynamics, 54, 4399–4421. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05234-1

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Cambios observados y escenarios climáticos futuros para Argentina para diferentes horizontes temporales y umbrales de calentamiento global. https://ciam.ambiente.gob.ar/images/uploaded/recursos/544/Informe%20FUNDACEN%202023%20(SInIA).pdf

Morales, M. S., Cook, E. R., Barichivich, J., Christie, D. A., Villalba, R., LeQuesne, C., Srur, A. M., Ferrero, M. E., González-Reyes, A., Couvreux, F., Matovsky, V., Aravena, J. C., Lara, A., Mundo, I. A., Rojas, F., Prieto, M. R., Smerdon, J. E., Bianchi, L. O.,

Masiokas, M. H., Urrutia, R., Rodriguez-Catón, M., Muñoz, A. A., Rojas-Badilla, M., Alvarez, C., Lopez, L., Luckman, B., Lister, D., Harris, I., Jones, P. D., Williams, A. P., Velazquez, G., Aliste, D., Aguilera-Betti, I., Marcotti, E., Flores, F., Muñoz, T., Cuq, E., & Boninsegna, J. A. (2020). Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(29), 16816–16823. https://doi.org/10.1073/pnas.2002411117

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9(9), 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F., Espinoza, J. C., Borrel, L. F., Goubanova, K., Lavado-Casimiro, W., Masiokas, M., Solman, S., & Villalba, R. (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. Frontiers in Earth Science, 8, 61. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061

Pepin, N., Bradley, R., Diaz, H., Baraer, M., Cáceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., Williamson, S. N., & Yang, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Climate Change, 5(5), 424–430. https://doi.org/10.1038/nclimate2563

Rivera, J. A. & Gulizia, C. N. (2025). Centennial-scale evaluation of hydrological drought: insights from a snowfed river basin in the Andes. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. Manuscrito en revisión.

Rivera, J., Robo, M., Bianchi, E. & Mulleady, C. (2024). Impact of climate change on the streamflow in northern Patagonia. Journal of Water and Climate Change, 15(5), 2074–2091. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.492

Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in central-western Argentina. Frontiers in Water, 3, 640544. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544

Rivera, J. A. & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: climatic features and long-term trends (1901-2014). Atmospheric Research, 241, 104953. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953

Rivera, J. A., Naranjo Tamayo, E., & Viale, M. (2020). Water resources change in central-western Argentina under the Paris Agreement warming targets. Frontiers in Climate, 2, 587126. https://doi.org/10.3389/fclim.2020.587126

Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. Atmospheric Research, 213, 437–449. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023

Rivera, J. A., Penalba, O. C., Villalba, R. & Araneo, D. C. (2017). Spatio-temporal patterns of the 2010-2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. Water, 9(9), 652. https://doi.org/10.3390/w9090652

Robinson, A., Lehmann, J., Barriopedro, D., Rahmstorf, S. & Coumou, D. (2021). Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate. npj Climate and Atmospheric Science, 4, 45. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00202-w

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (eds.), Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013

Shahgedanova, M., Adler, C., Gebrekirstos, A., Grau, H. R., Huggel, C., Marchant, R., Pepin, N., Vanacker, V., & Vuille, M. (2021). Mountain observatories: Status and prospects for enhancing and connecting a global community. Mountain Research and Development, 41(2),

A1–A15. https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00054.1

Toum, E., Rivera, J. A., & Viale, M. (2023). Proyecciones del clima y de la oferta hídrica para las próximas décadas en la provincia de Mendoza. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA).

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L. E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J. A., & Zalazar, L. (2019). Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. Frontiers in Environmental Science, 7, 69. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejada, E. (2012). Accurate computation of a streamflow drought index. Journal of Hydrologic Engineering, 17(2), 318–332. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433

Villamayor, J., Khodri, M., Villalba, R. & Daux, V. (2021). Causes of the long-term variability of southwestern South America precipitation in the IPSL-CM6A-LR model. Climate Dynamics, 57, 2391–2414. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05811-y

World Meteorological Organization (WMO). (2025). State of the global climate 2024 (WMO-No. 1368). https://library.wmo.int/idurl/4/69455

Wu, Y., Miao, C., Fan, X., Gou, J., Zhang, Q., & Zheng, H. (2022). Quantifying the uncertainty sources of future climate projections and narrowing uncertainties with bias correction techniques. Earth's Future, 10(12), e2022EF002963. https://doi.org/10.1029/2022EF002963

Wu, Z., & Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. Advances in Adaptive Data Analysis, 1(1), 1–41. https://doi.org/10.1142/S1793536909000047

Zazulie, N., Rusticucci, M. & Raga, G. B. (2018). Regional climate of the Subtropical Central Andes using high-resolution CMIP5 models. Part II: future projections for the twenty-first century. Climate Dynamics, 51, 2913–2925. https://doi.org/10.1007/s00382-017-4056-4

Zazulie, N., Rusticucci, M. & Raga, G. B. (2017). Regional climate of the subtropical central Andes using high-resolution CMIP5 models—part I: past performance (1980–2005). Climate Dynamics, 49(11–12), 3937–3957. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3560-x

3 DIGITALIZACIÓN Y DATOS ABIERTOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ESCENARIO DE CRISIS CLIMÁTICA

Ing. Mtr. Ignasi Servià Goixart[4]

3.1 RESUMEN

España, y de manera muy especial las cuencas internas de Catalunya, donde el 52% del territorio acumula el 92 % de su población, han vivido entre 2022 y 2025 el episodio más importante de sequía del último siglo. Durante este tiempo se ha gestionado la sequía con el Plan Emergencia por Sequía de Catalunya y se han generado nuevos datasets. Aparte de compartir experiencias en el ámbito del agua urbana, también realizo algún comentario para el agua para riego.

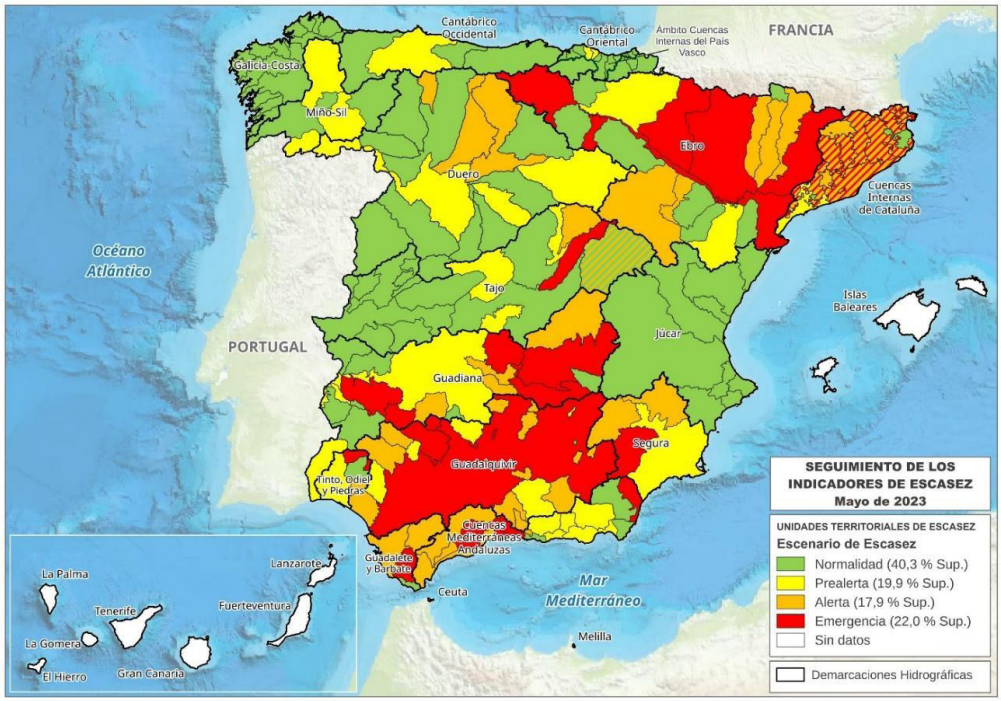
Al final del capítulo se proponen 3 etapas a definir en todo proyecto de digitalización de la gestión del agua en un escenario de crisis climática.

3.2 LA SEQUÍA DE 2023 EN ESPAÑA

La sequía vivida en España durante el 2023 ha sido la más importante del último siglo, especialmente en las cuencas internas de Catalunya (Cuadro 3.1). A nivel del conjunto de territorio nacional el momento más complejo fue en el mes de mayo de 2023. En el mes de junio se registraron precipitaciones por encima de la media, que, si bien no solucionó el problema, sí evitó llegar a una situación crítica de determinados territorios.

4 Ingeniero Agrónomo y Máster en Gestión del Medio Ambiente por la Universidad de Lleida. MBA por la Universidad de Barcelona.

Cuadro 3.1 **Seguimiento de los indicadores de escasez para el conjunto de España para mayo de 2023**



Fuente: Ministerio de Transición ecológica del Gobierno de España.

3.3 Sequía en Catalunya

3.3.1 El visor de la sequía

La sequía en las cuencas internas de Catalunya se alargó varios meses más a la de otras demarcaciones en España. En el análisis y contexto climático de la sequía 2021-2024 (Alta-va-Ortiz, Vicent; et al), se realiza una clasificación por el porcentaje de superficie según el IPE a 36 meses. La sequía más intensa ha sido la de 2021-2024, en segundo lugar la del 2004-2008, y la tercera la de 2015-2018.

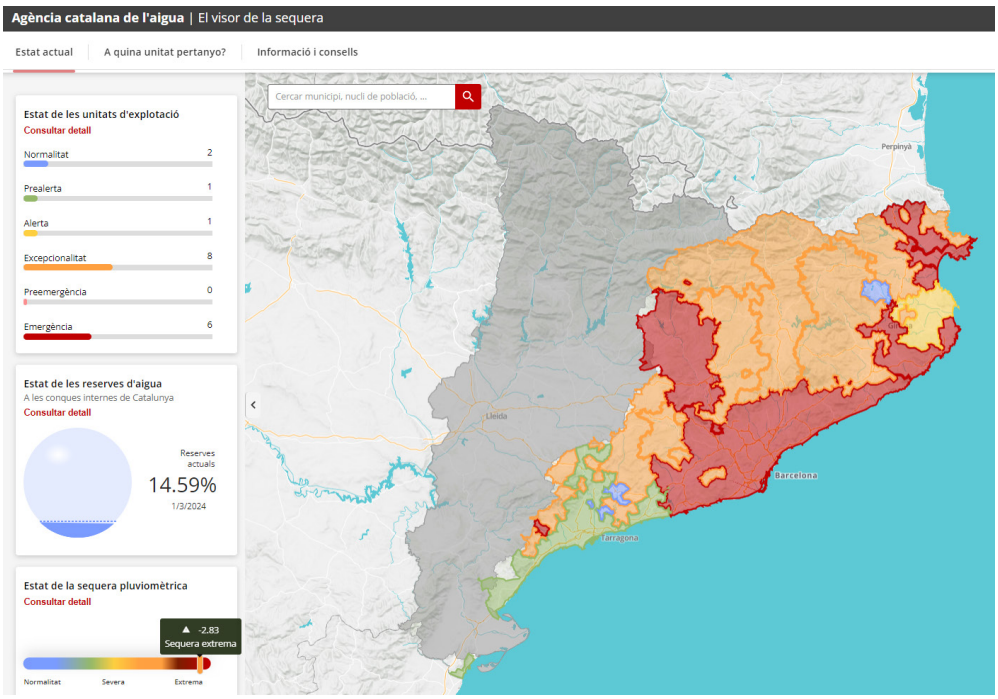
Para poder visualizar los diferentes estados de la sequía de una forma sencilla la Agencia Catalana del Agua, desarrolló un visor de la sequía para las cuencas internas de Catalunya. En Servia, Ignasi (7), comparto las principales características del visor de la sequía del ACA. Como se puede comprobar en el Cuadro 3.2 en el mes de marzo de 2024 existían 6 unidades de explotación en situación de Emergencia I y 8 unidades más en excepcionalidad.

El plan "Especial de actuación en situación de alerta y eventual sequía" de Catalunya (10) define que los escenarios de sequía meteorológica se fijan en función del IPE de los últimos meses, mientras que los escenarios de sequía hidrológica se determinan en función del IPE, del nivel freático o en función del nivel de reservas de los embalses, dependiendo cual es la principal fuente de abastecimiento.

De las 18 unidades de explotación definidas en Plan hay 5 unidades que la sequía hidrológica se define según el IPE a diferentes periodos. En el Cuadro 3.1 se presenta el IPE según diferentes condiciones meteorológicas o escenarios de sequía.

El visor es una herramienta para que las diferentes personas, empresas y entidades puedan consultar en todo momento en qué estado de sequía está su municipio y también qué limitaciones existen en los diferentes usos del agua.

Cuadro 3.2 Visor de la sequía de Cuencas Internas de Catalunya (Agencia Catalana del Agua). A fecha 1/3/2024



Fuente: Ministerio de Transición ecológica del Gobierno de España.

El Plan de Emergencia por sequía de Catalunya, se fundamenta en que, al incrementarse la emergencia por sequía, se incremente la producción de agua de recursos de agua no convencionales (desalación y regeneración procedente de EDAR) y reduzcan de manera progresiva las dotaciones. En el Cuadro 3.4 se representa la reducción de dotación de agua urbana, y también en el resto de los usos de agua. Similar información se puede ver en el Cuadro 3.5. La sequía registrada implicó unas reducciones muy importantes en algunos usos, y actualmente ya está contemplado que las reducciones sean menores en la agricultura y en la ganadera si hay un uso eficiente y se presenta un Plan de ahorro de agua.

En algunas regiones de Francia cuando se declara la emergencia no se puede regar por gravedad, esta modificación viene a decir una cosa similar. En situación de emergencia la reducción del riego tradicional será del 80%, mientras que en regadío localizado con méritos de gestión del 5%.

Cuadro 3.3

IPE según las condiciones meteorológicas (meteocat), y según escenarios de Visor de la sequía de Cuencas Internas de Catalunya (Agencia Catalana del Agua).

Condiciones meteorológicas

Límite inferio	*Límite Superio*	*Condiciones*
> 2,5		humedad excepcional
2,0	2,5	humedad extrema
1,5	2,0	humedad fuerte
1,0	1,5	humedad moderada
-1,0	1,0	normalidad
-1,5	1,0	sequía moderada
-2,0	-1,5	sequía fuerte
-2,5	-2,0	sequía extrema
	< -2,5	sequía excepcional

Índice de Precipitación Estándar a 12 meses

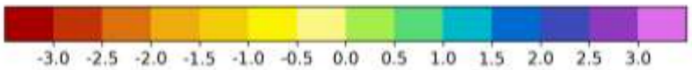
Sequía Meteorológica

Valor IPE	*Estado Sequia Meteorológica*
$IPE_{12} < -1,28$	Sequía Severa
$IPE_{24} < -1,65$	Sequía Extrema

Sequía Hidrológica

Valor IPE	*Estado Sequia Hidrológica*
$IPE_9 < -1,0$ o $IPE_{12} < -1,0$	Prealerta
$IPE_9 < -1,5$ o $IPE_{12} < -1,5$	Alerta
$IPE_{24} < -2$	Excepcionalidad

Representación Gráfica



Cuadro 3.4

Reducción inicial de los diferentes usos del agua, según escenarios de sequía. "Especial de actuación en situación de alerta y eventual sequía" de Catalunya

			% Reducción por usos y escenario de sequía				
Estado Hidrológico	% Reserva Embalses	Dotacione Máximas Agua urbana (l/hab/dia)	Riego Agrícola	Uso Ganadero	Uso Industrial	Usos recreativo que impliquen riego	Otros usos recreativos
NORMALIDAD							
PREALERTA	60%						
ALERTA	40%	**250**	25%	10%	5	30	5
EXCEPCIONALITAT	25%	**230**	40%	30%	15	50	15
EMERGÈNCIA NIVELL I	16%	**200**	80%	50%	25	Prohibido	25
EMERGÈNCIA NIVELL II		**180**					
EMERGÈNCIA NIVELL III		**160**					

3.3.2 La sequía en la cuenca del Segre

Como puede verse en el Cuadro 3.1 una buena parte de la demarcación del Ebro estaba en emergencia, especialmente las cuencas del margen izquierdo, que tienen las aportaciones naturales de los Pirineos. Muchas de las zonas regables tuvieron que realizar importantes prorrateos para sacar adelante una parte de sus cultivos. Una de las cuencas que se vio más afectada fue la Cuenca del Segre, en la que el canal de la principal zona regable se tuvo que cerrar a finales de abril de 2023, justo unas semanas después

Cuadro 3.5

Modificación de la reducción de los diferentes usos del agua, según escenarios de sequía. "Especial de actuación en situación de alerta y eventual sequía" de Catalunya.

Escenario de sequía	Riego por GRAVEDAD con conducciones a cielo abierto		Riego por ASPERSIÓN con conducciones a pressión		Riego LOCALIZADO con conducciones a pressión	
	Básico	Con todos los méritos de gestión	Básico	Con todos los méritos de gestión	Básico	Con todos los méritos de gestión
Alerta	**25,0%**	15,0%	15,0%	5,0%	5,0%	5,0%
Excepcionalidad	**40,0%**	30,0%	25,0%	15,0%	10,0%	5,0%
Emergencia	**80,0%**	65,0%	40,0%	25,0%	15,0%	5,0%

Escenario de sequía	REDUCCIONES					
	PES	HEMBRAS	PORCINO	PORCINO con todos los méritos	RESTO DE GANADO	RESTO DE GANADO con todos los méritos
Alerta	**10,0%**	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Excepcionalidad	**30,0%**	0,0%	5,0%	0,0%	5,0%	0,0%
Emergencia	**50,0%**	0,0%	11,0%	11,0%	28,6%	14,6%

de iniciarse la campaña de riegos. El cierre del canal principal del Canal d'Urgell no se había producido en 161 años de historia. En Servia, Ignasi (7) se puede ver la evolución del índice de sequía del conjunto de la Cuenca del Ebro.

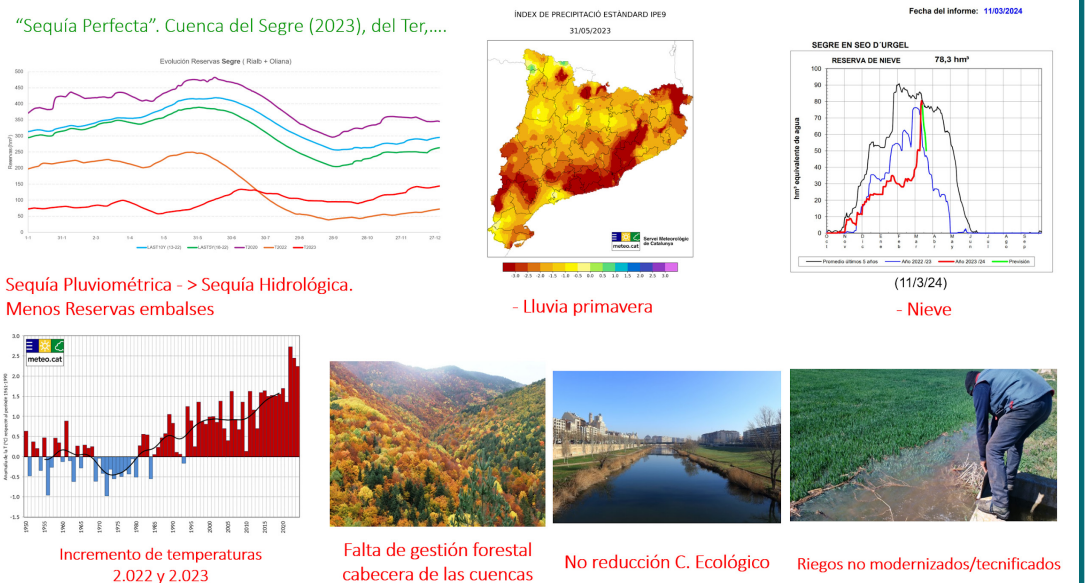
Para llegar a este escenario de sequía extrema coincidieron a la vez un importante número de factores, en más de una ocasión lo he definido como la **sequía perfecta** (Cuadro 3.6). Utilizo este concepto porque el incremento de los diferentes factores hace que se multipliquen los efectos de la sequía.

El seguimiento de todas estas variables debe ser de gran utilidad a la región de Mendoza. En Servià, Ignasi (4) se puede comprobar como la reducción de las reservas de agua en forma de nieve condicionó de manera importante la campaña de riegos de la cuenca de Segre en 2024. El seguimiento de esta variable es de gran importancia para estimar la disponibilidad de agua de los regadíos de Mendoza.

Precipitaciones inferiores a la media y temperaturas con anomalías positivas de 2,5°C llevaron a que mayo de 2022 se declarara en la cuenca del Segre el escenario de emergencia por sequía. Desde el organismo de cuenca se comunicó de manera correcta, pero algunas personas del territorio no acabaron valorar la gravedad de la situación y se confiaba que durante el otoño / invierno se recuperarían los niveles de reservas de agua. Se debe utilizar la digitalización para monitorizar en tiempo real y compartir por los

Cuadro 3.6

Combinación de diferentes factores que provocaron la sequía perfecta en 2023 en la cuenca del Segre. Origen de las imágenes: elaboración propia, meteocat, confederación hidrográfica del Ebro.



diferentes canales, cómo evolucionan los diferentes parámetros y cuál es el escenario de sequía.

Los 7 puntos principales que coincidieron en la sequía que afectó tanto a los regadíos de la cuenca del Segre son los siguientes:

1. Sequía hidrológica por unos niveles de reserva inferiores a la media, debidos a una reducción de aportaciones y elevadas temperaturas durante el año 2022.
2. Precipitaciones de primavera bastante inferiores a la media, con bastantes zonas con IPE a 12 meses inferior a -3. Recordar que un IPE inferior a -2,5 se utiliza para catalogar una sequía excepcional.
3. En primavera no llovió, pero tampoco nevó en la cabecera de las cuencas (Pirineos). Al no haber nieve, no se registraron las aportaciones de mayo producidas por el deshielo, conocidas como mayencos. En la zona de Mendoza, estas aportaciones en forma de nieve son fundamentales.
4. Los años 2022 y 2023 se registraron anomalías de temperatura próximas a +2,5°C, que incrementaron de manera importante las necesidades de agua de riego y redujeron las aportaciones en los ríos.

5. La baja rentabilidad de la agricultura de montaña y las explotaciones forestales está llevando al abandono de parcelas agrícolas y que las masas forestales cada vez sean más densas, reduciendo las aportaciones de agua a los ríos. En el verano de 2025 hemos visto muchos incendios forestales. La gestión de un territorio tiene relación directa con la prevención de incendios forestales, pero también con la gestión del agua.
6. En determinados tramos de masas de agua se redujeron los caudales, pero en la cuenca del Segre se mantuvieron porque existen zonas incluidas en Red Natura 2000. La red Natura 2000 es la iniciativa política europea más importante de conservación del patrimonio natural, hacer compatible la protección de las especies y los hábitats naturales y seminaturales con la actividad humana que se desarrolla.
7. En la Cuenca del Segre existe una proporción elevada de regadíos tradicionales, que tienen pendiente su modernización. Una de las principales características de los regadíos modernizados es que tiene la posibilidad de aplicar pequeñas dotaciones de agua o en determinados sectores de riego, cuando los recursos de agua son escasos.

3.3.3 La sequía nos demanda datasets con mayor resolución temporal

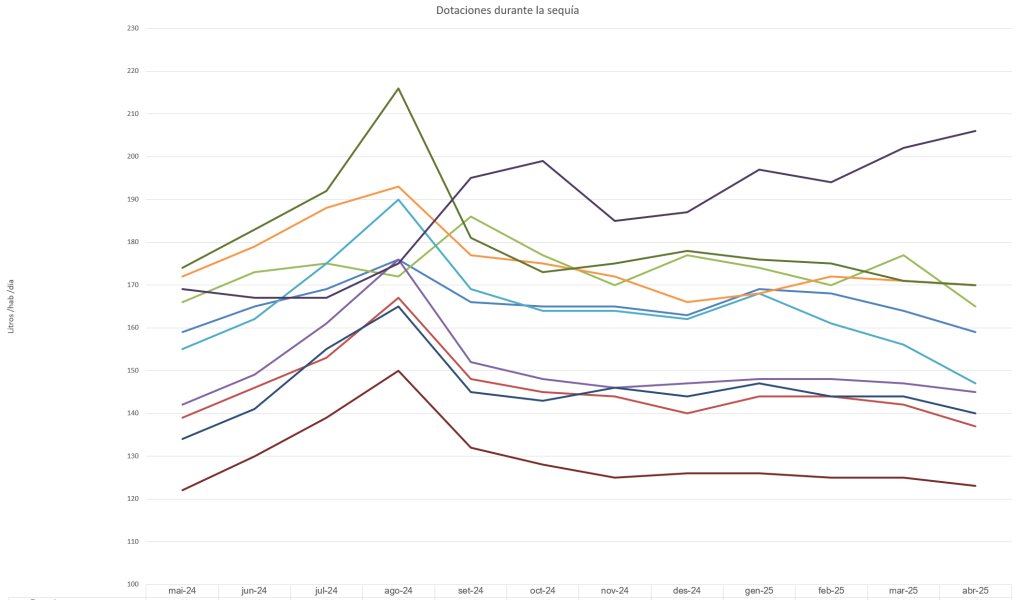
La Agencia Catalana del Agua comparte como dato abierto desde el año 2012 los volúmenes de agua urbana, divididos en 2 componentes: volumen doméstico y Actividades Económicas/fuentes propias. Este data set para toda Catalunya se actualiza con una periodicidad anual.

Con el episodio de sequía tan importante que afectó Catalunya se tenía que poder consultar prácticamente en tiempo real cuáles eran las dotaciones l/hab/día de los diferentes municipios de las cuencas internas de Catalunya, para ver cuales cumplían lo que definía el Plan de emergencia por sequía. Servia, Ignasi (3)

Se creó un Dataset con datos mensuales entre mayo de 2024 y abril de 2025 que exigía un intercambio más frecuente de datos entre los diferentes municipios y el organismo de cuenca, y también conocer la población que realmente hay en cada municipio. Se pasó de compartir datos con una periodicidad anual a hacerlo con una periodicidad mensual, en el Cuadro 3.7 se presenta la evolución de la dotación de agua urbana a entrada de municipio, de los 10 municipios de más población de las cuencas internas de Catalunya.

Cuadro 3.7

Dotaciones de los 10 municipios de Cuencas internas de Catalunya con mayor población durante la sequía. Consulta en Julio/2025 del Dataset de datos abiertos de consumo global de agua para abastecimiento de la población.



	mai-24	jun-24	jul-24	ago-24	set-24	oct-24	nov-24	des-24	gen-25	feb-25	mar-25	abr-25
Barcelona	159	165	169	176	166	165	165	163	169	168	164	159
Hospitalet de Llobregat, l'	139	146	153	167	148	145	144	140	144	144	142	137
Terrassa	166	173	175	172	186	177	170	177	174	170	177	165
Badalona	142	149	161	176	152	148	146	147	148	148	147	145
Sabadell	155	162	175	190	169	164	164	162	168	161	156	147
Tarragona	172	179	188	193	177	175	172	166	168	172	171	170
Mataró	134	141	155	165	145	143	146	144	147	144	144	140
Santa Coloma de Gramenet	122	130	139	150	132	128	125	126	126	125	125	123
Reus	174	183	192	216	181	173	175	178	176	175	171	170
Girona	169	167	167	175	195	199	185	187	197	194	202	206

3.3.4 Creación de nuevos datasets

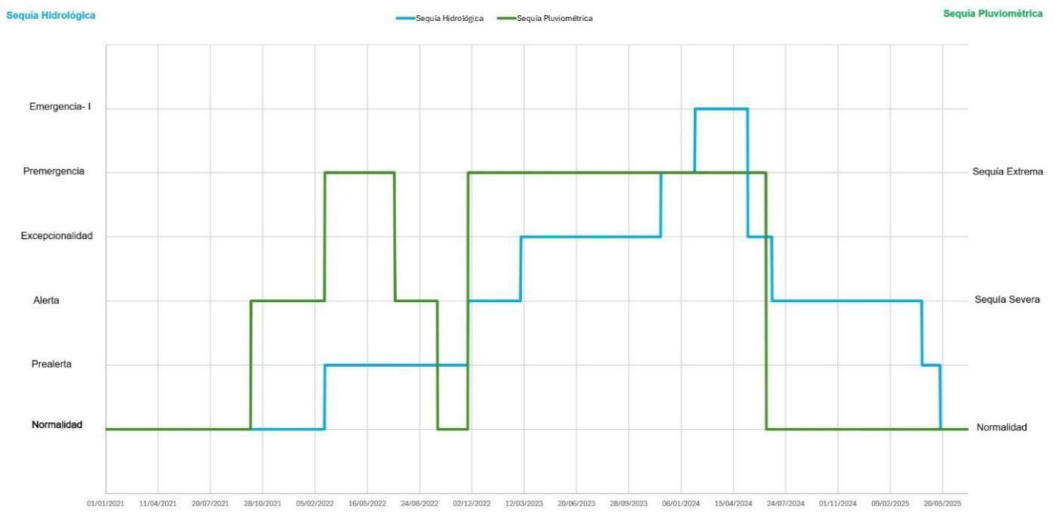
Al llegar la sequía también se han creado nuevos datasets de información. Compartiré 2 datasets nuevos, así como una Cuadro que relaciona ambos. El primer dataset lo solicité, y en él se puede consultar para cada municipio de las cuencas internas de Catalunya cual es la fecha de cambio en el estado de sequía hidrológica y pluviométrica. Servia, Ignasi (5). No se trata de datos abiertos que se producen de manera continua, sino de hitos en los estados de sequía, con una publicación en el DOGC (Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya)

El seguimiento de la sequía pluviométrica se define en función de la IPE (Índice de Precipitación Estándar), mientras que el estado de sequía hidrológica depende de la unidad de explotación, principalmente se tiene en cuenta el nivel de agua en los embalses, pero también por el nivel piezométrico o por el IPE (Índice de Precipitación Estándar). En la unidad Ter-Llobregat se decretó la prealerta de sequía hidrológica el 24/2/2022, y no se ha recuperado la normalidad hasta el 16/05/2025, con declaración de Emergencia-I durante la primavera de 2024.

En el Cuadro 3.8 se representa el escenario de sequía hidrológica y sequía pluviométrica en la unidad de Explotación Ter-Llobregat. Se puede observar, como primero se registra una sequía pluviométrica, precipitaciones inferiores a la media. Debido a esta reducción de aportaciones, posteriormente se registra la sequía hidrológica, una reducción de los niveles de reserva de agua, respecto a años hidrológicos anteriores.

Cuadro 3.8

Evolución de la Sequía pluviométrica y la Sequía hidrológica en unidad de Explotación Ter-Llobregat. Cuadro propio, obtenido a partir de representar datos abiertos.



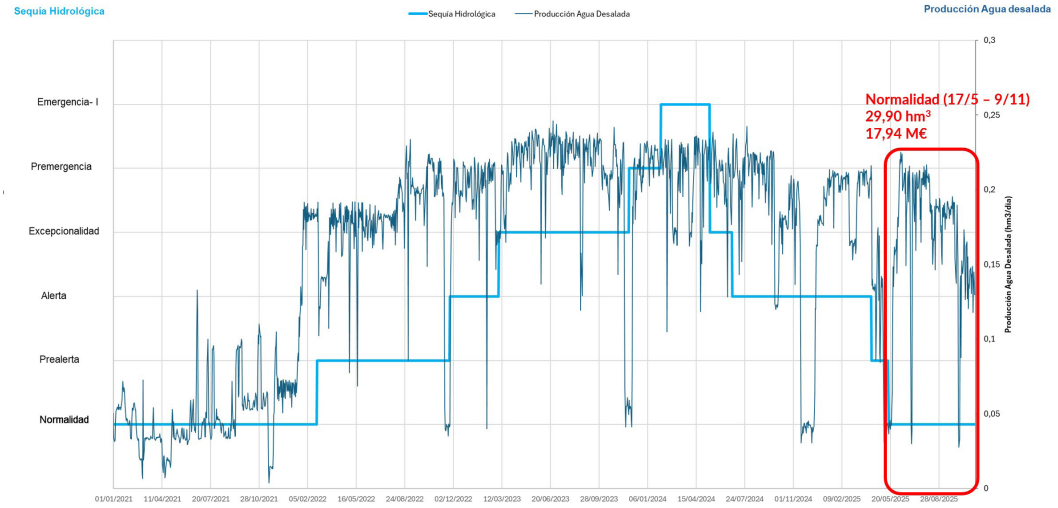
Si se mantiene en el tiempo la sequía pluviométrica, se intensifican los efectos de la sequía, estados de sequía hidrológica cada vez más intensos. Servia, Ignasi (9)

El segundo data set es el volumen de producción diario de agua de las dos desalinizadoras que dispone actualmente Cataluña, Tordera y Prat de Llobregat Servia, Ignasi (6). Los datos son desde el 1 de enero de 2013 hasta la actualidad para la desalinizadora de El Prat de Llobregat y desde el 7 de diciembre de 2015 hasta la actualidad para la desalinizadora de la Tordera. El coste de producción de agua desalada presenta un diferencial de precio, por el uso intensivo de energía en la ósmosis.

En el Cuadro 3.9 se combinan estos 2 datasets, y se puede observar cual ha sido la producción de agua desalada durante los diferentes escenarios de sequía en las cuencas internas de Catalunya Servia, Ignasi (9). Se puede observar cómo en mayo de 2025 se ha declarado el estado de normalidad hidrológica, pero se ha decidido mantener una elevada producción de agua desalada. Parece ser que se está trabajando para que la producción de agua desalada, se avance del estado de alerta al estado de normalidad/prealerta.

Cuadro 3.9

Evolución de la producción del agua desalada y los estados de sequía para la unidad de Explotación Ter-Llobregat. Elaboración Propia.



3.3.5 Digitalización de las Comunidades de Regantes para disponer de más datos

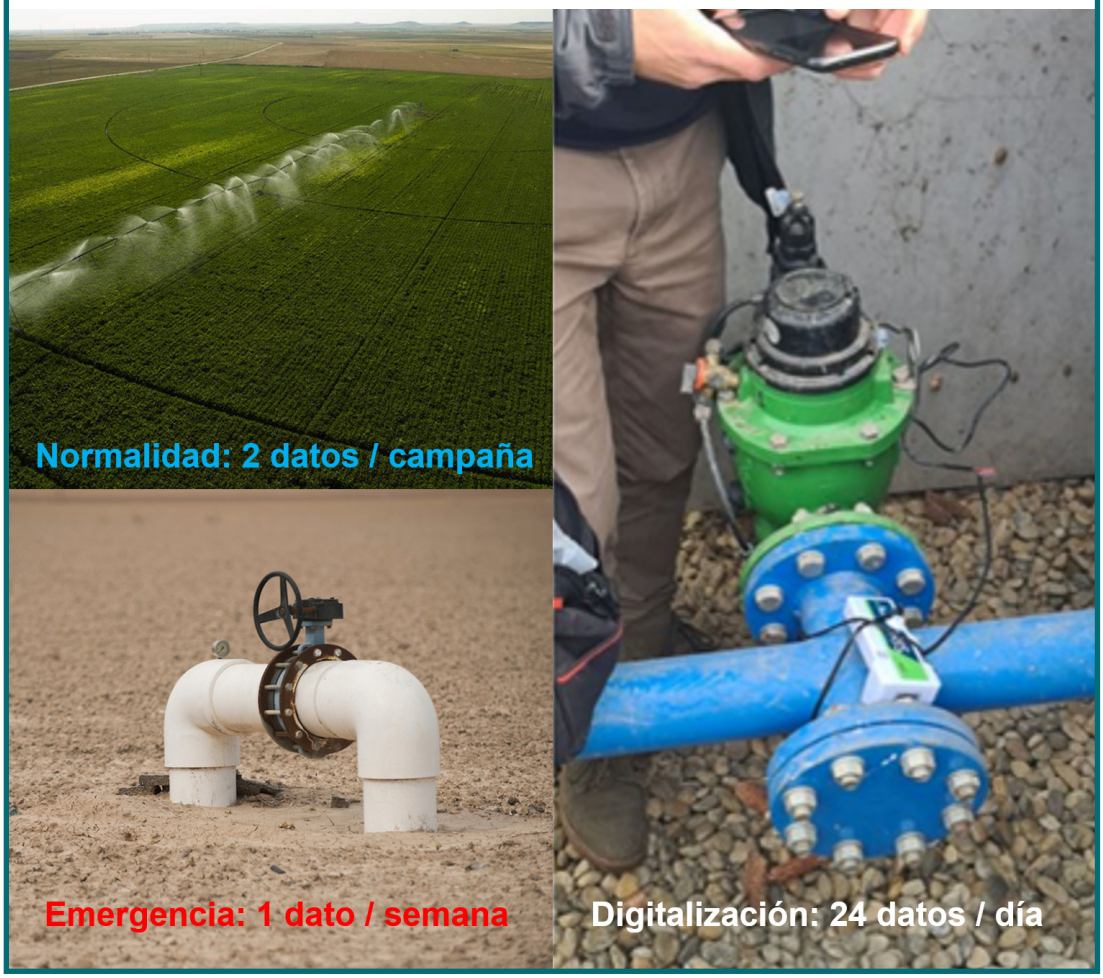
En el punto anterior he compartido cómo la sequía obligó al agua urbana a disponer de datos con una mayor resolución temporal. En el caso del regadío también se ha observado la necesidad de incrementar la resolución de los datos temporales El Canal Aragón y Catalunya cuenta con 105.000 ha de regables, el segundo más grande de España, entre las provincias de Huesca y Lleida y su actividad empezó en el año 1906.

La mayoría de las comunidades de base del Canal Aragón y Cataluña se hallan modernizadas, pero no digitalizadas. Es decir, disponen de una red presurizada para poder regar por aspersión, pívots o riego localizado, pero no se conocen en tiempo real los consumos de agua de los diferentes hidrantes (Cuadro 3.10). En situación de normalidad se trabaja con 2 datos de contador para aplicar las tarifas binómica, uno antes de iniciar la campaña de riegos, y el otro al finalizar dicha campaña de riegos.

Durante la sequía de 2023 se tuvieron que aplicar prorrateos muy importantes, y los comuneros debían aportar a la comunidad de base datos semanales de las lecturas de sus contadores comunitarios para comprobar que los regantes individuales estaban por debajo de los prorrateos. Tuve noticias de regantes que manipularon las lecturas, y esto les supuso sanciones importantes.

Cuadro 3.10

Disponibilidad de datos en la Comunidad de Regantes de Base Aragón y Cataluña, según diferentes escenarios.



Si estas comunidades de regantes hubieran estado digitalizadas hubieran tenido datos horarios y diarios de los diferentes contadores. La primera modernización es pasar de regadío tradicional a riego presurizado, la segunda es la entrada de energía renovable para reducir la huella de carbono y mejorar la competitividad y la tercera modernización es la digitalización.

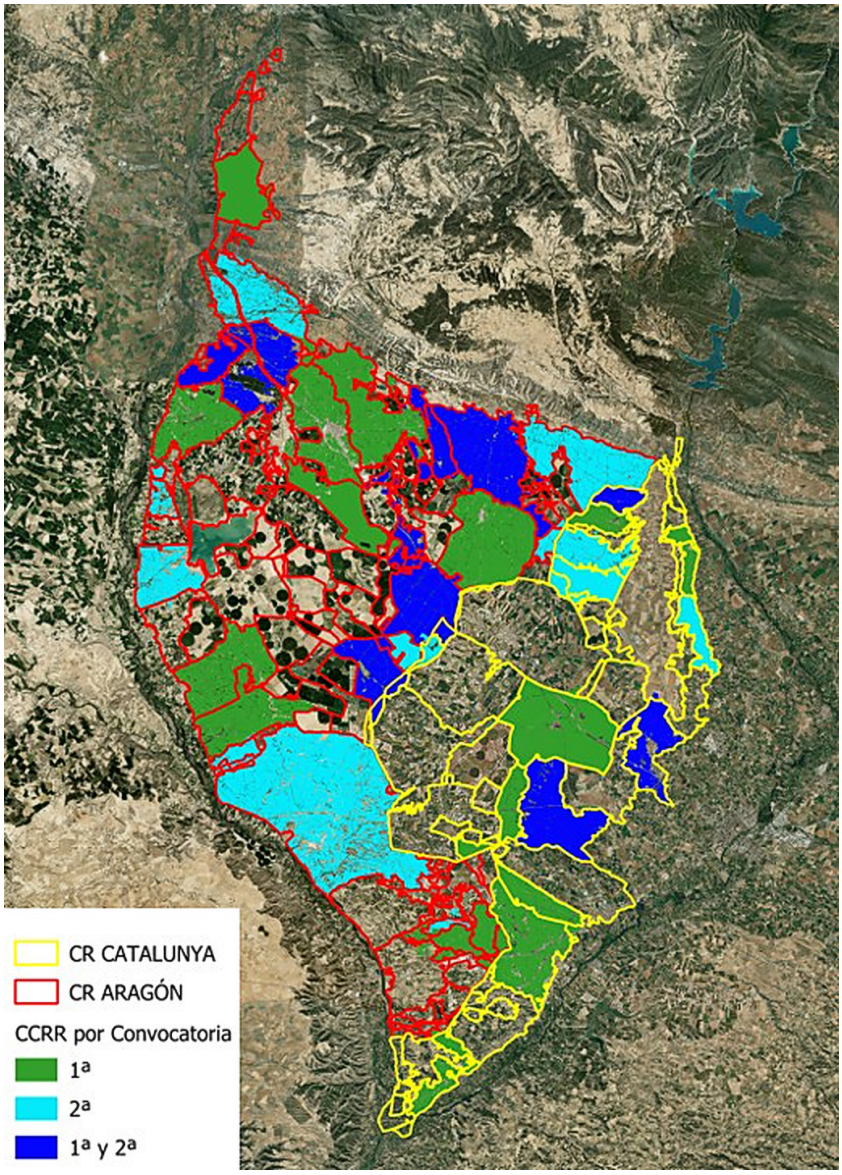
Después de la pandemia se crearon con fondos Europeos el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. El día mundial del agua (22/3/2022) se presentó el **PERTE** (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) **del ciclo del agua** (11). La componente 5 es la preservación del espacio litoral y los recursos hídricos, identifica como una de las prioridades tener un adecuado conocimiento de la información asociada a los diferentes usos y consumos, donde se considera fundamental la transición digital en el sector del agua.

En agua urbana ya se han resuelto 3 convocatorias por valor de 550 M€ de ayudas, mientras que en regadío hubo una primera convocatoria de 100 M€ y ahora se espera la resolución de una segunda convocatoria por 100 M€.

En la primera convocatoria del PERTE (Cuadro 3.11) la comunidad General de regantes del Canal Aragón y Catalunya ha sido beneficiaria con un proyecto PERTE, y coordinará 2 proyectos más que agrupan 29 comunidades de base. Servia, Ignasi (8)

Cuadro 3.11

Distribución de las Comunidades de Base que han sido beneficiarias de la primera convocatoria del PERTE de digitalización del regadío



En la segunda convocatoria del PERTE, próxima a resolverse, se han presentado un importante número de comunidades de base, pero en este caso de manera individual.

Regar es aplicar a los cultivos la cantidad de agua que estos necesitan, y por tanto las dosis de riego puede variar de manera importante entre las diferentes campañas de riego. En el Cuadro 3.12 se presenta las dotaciones de riego aplicadas en una parcela comercial del Canal Aragón y Catalunya, con doble cultivo de cebada y maíz, pueden presentar diferencias muy importantes. Así en el año 2025, con una primavera con precipitaciones muy por encima de la media, se empezó a regar la cebada en el mes de mayo.

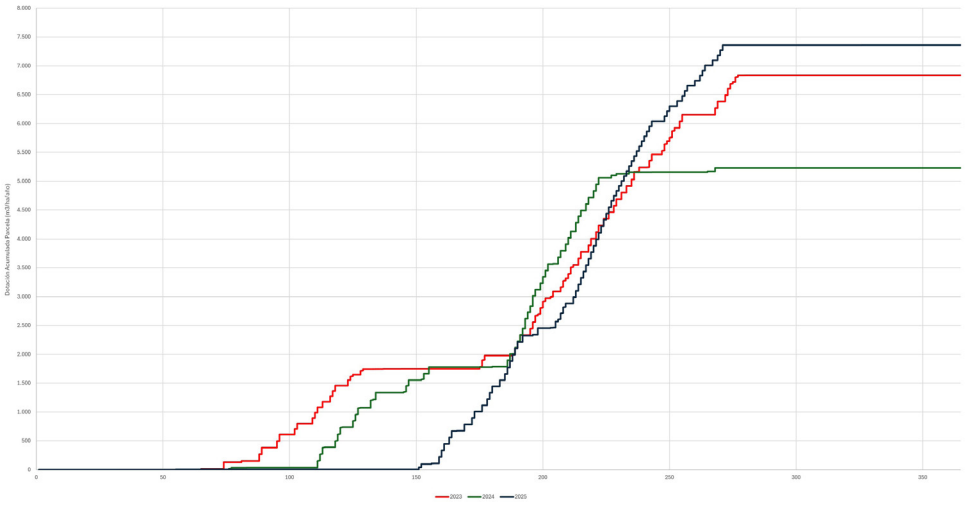
Los 2 principales regadíos de la cuenca del Segre con el Canal d'Urgell y el Canal Segarra-Garrigues. Mientras el primero está acabando de validar las condiciones para avanzar en la modernización, la segunda comunidad empezó a regar el año 2006 y todos sus hidrantes están telecontrolados y disponen de las lecturas en tiempo real.

La mayoría de los sistemas de telemedida/telecontrol monitorean volúmenes de agua, pero no la cantidad de agua por unidad de superficie. Es de gran importancia disponer de la superficie que se riega desde cada hidrante. Las lecturas de volúmenes no se pueden comparar entre parcelas de diferentes superficies, las estimaciones de dotaciones, sí.

Durante la sequía de 2023, en el Segarra-Garrigues aparecieron algunas fincas que les tocaba menos agua, y esto era debido a que alguna estaba regando una superficie mayor de la que se había dado de alta.

Cuadro 3.12

Evolución de la dotación aplicada en una parcela comercial en el Aragón y Cataluña con doble cultivo (cebada – maíz). Campañas de riego 2023, 2024 y 2025. Elaboración propia.



3.4 Propuesta de ruta hacía la digitalización de la gestión del Agua

De manera simplificada destacaría 3 etapas en todo proyecto de digitalización de la gestión del agua, ya sea agua urbana o agua de regadío para la producción de alimentos:

1. **Promoción de la digitalización**. En todo proyecto de Transformación Digital existe un 20% de digitalización y un 80% de gestionar el cambio en las personas. Si las personas no están preparadas para este cambio no tendrá sentido desarrollar el proyecto de digitalización. De manera similar tenemos una cantidad importante de otras características que se deben cumplir antes del inicio de la redacción del proyecto.
    1. Líderes que motiven el cambio. Hacia una gestión datacéntrica del agua.
    2. Cambios legislativos que promuevan el cambio. Subvenciones condicionadas a la contabilidad del agua o al uso de tarifas binómicas.
    3. Técnicos con una formación interdisciplinar actualizada a las necesidades actuales. En algunos casos la formación debe llegar a los usuarios finales.
    4. Relevo generacional en las entidades y captar el talento.
    5. Jornadas demostrativas para compartir pilotos que permitan ver lo que puede aportar la digitalización.
    6. Disponer de la información digitalizada y estructurada para desarrollar el proyecto.
    7. Líneas de ayuda o financiación que permitan desarrollar los proyectos de digitalización. Tanto a nivel de comunidades de regantes como a nivel de explotaciones.
    8. Concienciación de la importancia del cambio climático y la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua.
    9. Conocimiento de las características de las diferentes herramientas tecnológicas.
    10. Ejecución de infraestructuras del ciclo del agua y de telecomunicaciones previas al desarrollo del proyecto.

2. **Desarrollo del proyecto de digitalización**. En todo proyecto hay diferentes fases: redacción del proyecto, licitación y dirección/ejecución de las obras. Los proyectos de digitalización no son ninguna excepción y se debe realizar un buen proyecto para satisfacer las necesidades de cada instalación. Se deben elegir los sensores, las comunicaciones, las plataformas, etc. En un pequeño municipio puede encajar una tecnología Lorawan, mientras que en una comunidad de regantes extensa puede ser más apropiado utilizar tecnología NB-IOT.

3. **Mantenimiento de los sensores y explotación de los datos**. La digitalización empieza cuando se empiezan a generar datos. Debemos garantizar que los sensores produzcan datos de calidad para tomar las mejores decisiones y que se exploten los datos apropiadamente para sacar valor a los mismos. El valor de la digitalización es la producción de datos de manera continua en todos los sensores, no trabajemos solo con 2 datos.

De manera intencionada he planteado una fase de promoción de la digitalización, previa al desarrollo del proyecto. He visto diferentes digitalizaciones en que no se cumplen las características de la promoción y estos proyectos no han sido sostenibles en el tiempo.

Una de las principales características es que exista una tecnificación interdisciplinar de estas entidades. Si algunas entidades tienen una dimensión que no facilita su tecnificación, se deberá realizar un diagnóstico territorial para validar que solución permite optimizar más los recursos.

3.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se han compartido una serie de ejemplos que he observado en la digitalización en el ciclo de agua en Cataluña durante la importante sequía de 2.023. Se ha incrementado la frecuencia temporal de algunos datasets y también se han empezado a compartir otros. También se han compartido ejemplos en la digitalización de las principales comunidades de regantes de Catalunya.

Los datos pueden ser datos abiertos que se comparten de manera abierta al conjunto de la sociedad, o datos propios generados por diferentes entidades que están gestionando el ciclo del agua: organismo de cuenca, entidades municipales que gestionan el ciclo del agua o comunidades de regantes.

Solo se avanzará en la digitalización de la gestión del ciclo del agua, si antes se realiza una importante etapa de promoción de la digitalización. La tecnificación pluridisciplinar debe ser previa al desarrollo del proyecto, y sin esta la digitalización no se mantendrá en el tiempo.

La digitalización de la gestión del agua supone la ejecución de proyectos y costes de mantenimiento, pero a la vez disponemos de información en tiempo real para el conjunto de los sensores.

Acabaré este artículo con algunas recomendaciones prácticas sobre la aportación de la digitalización de la gestión del agua:

- **Disponer de datos 24/7 de todos los sensores**. No es lo mismo tener datos de los contadores cuando se realizan lecturas, que tener información en todo

momento. He visto Comunidades de Regantes que tienen sistemas de telelectura/telecontrol y que gestionan el agua a partir de fotos de los contadores al inicio y final de campaña. Disponer de las lecturas en continuo nos permite optimizar la dosis de riego y el uso de energía y detectar fugas de agua. La transformación digital es 80 % transformación y 20 % digitalización, por lo que para sacar valor debemos adaptar los métodos de trabajo.

- **Validar los datos de los sensores**. Es mejor no disponer de un dato, que disponer de un dato erróneo. Se debe verificar que los datos producidos representan la realidad que queremos monitorizar.
- La digitalización nos permite realizar detecciones tempranas en episodios de inundaciones o monitorizaciones detalladas de sequías, causadas por el cambio climático.
- **Producir datos que nos generen valor**. Debemos centrarnos en generar datos que nos generen valor. El ciclo del dato lo simplifico en adquisición del dato, análisis que permitan realizar una prescripción y finalmente en la ejecución de una acción. A veces me preguntan porque no se utiliza la información de las redes agroclimática en regadíos tradicionales, y la respuesta es porque estos no pueden ajustar sus dosis de riego, y continúan aplicando el agua según turnos de riego.

3.6 BIBLIOGRAFÍA

Altava-Ortiz, Vicent; Barrera-Escoda, Antoni; Barnolas, Mercè; Cortès, Maria; Assimenidis, Sotiris; Moré, Jordi; i Prohom, Marc. Análisis i contexto climático de la sequía 2021-2024 Nota de Estudio 76 del meteocat (Servicio meteorológico de Catalunya). Junio de 2.025

https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2025/07/02104135/nota-destudi-76-sequera-2021-24_VERSIo_FINAL.pdf

Servià Goixart, Ignasi. La actualización del Visor de la Sequía de Catalunya. 11/1/2023

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/actualizacion-visor-sequia-cataluna

Servià Goixart, Ignasi. #MWC2023. De la Alerta a la Excepcionalidad por sequía. Datos de consumo por municipios 2021. 1/3/2023

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/mwc2023-alerta-excepcionalidad-sequia-datos-consumo-municipios-2021

Servià Goixart, Ignasi. Cuando el problema en la Cuenca del Segre es que hay poca agua y poca nieve. 10/1/2023.

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/cuando-problema-cuenca-segre-es-que-hay-poca-agua-y-poca-nieve

Servià Goixart, Ignasi. Nuevo Dataset sobre sequía en Cataluña: de la visualización a la consulta de los datos. 15/1/2024

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/nuevo-dataset-sequia-cataluna-visualizacion-consulta-datos

Servià Goixart, Ignasi. Gracias ATL por producir agua desalada, por la visita a la ITAM y por el nuevo DATASET. 19/2/2024

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/gracias-atl-producir-agua-desalada-visita-itam-y-nuevo-dataset

Servià Goixart, Ignasi. La sequía de 2023: Presentación del Informe CH Ebro, simulador del ACA y la encuesta del TDR. 22/7/2024

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/sequia-2023-presentacion-informe-ch-ebro-simulador-aca-y-encuesta-tdr

Servià Goixart, Ignasi. Radiografiando en agosto resoluciones provisionales del PERTE digitalización del Ciclo del Agua. 26/8/2024

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/radiografiando-resoluciones-provisionales-perte-digitalizacion-ciclo

Servià Goixart, Ignasi. ¿La política está cambiando artificialmente el ciclo del agua? 15/7/2025

https://www.iagua.es/blogs/ignasi-servia-goixart/politica-esta-cambiando-artificialmente-ciclo-agua

Agencia Catalana del Agua. Gobierno de la Generalitat de Catalunya. Plan Especial de actuación en situación de alerta y eventual sequía. (Para Distrito de cuenca fluvial de Catalunya).

https://aca.gencat.cat/web/.content/30_Plans_i_programes/30_Pla_sequera/documents-PES/PES-consolidat-abril-2024.pdf

PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua.

https://www.prtr.miteco.gob.es/content/dam/prtr/es/perte/maquetacionperteoficialmoncloa-memoria-vertical-v1_tcm30-538587.pdf

4 MEDICIÓN DE LA NIEVE EN MENDOZA

Ing. Rodrigo Villarreal[5]

4.1 RESUMEN

Este capítulo integra la historia, los métodos y la instrumentación que sustentan la medición de la nieve en la provincia de Mendoza, abarcando desde cateos y calicatas hasta estaciones automáticas con telemetría satelital. Se detalla la evolución de la red nivometeorológica del DGI (SIH), con hitos como los ensayos de Agua y Energía Eléctrica, la operación automática nacional con meteor burst en los años ochenta, la implementación del SIH (1997, financiamiento Banco Mundial) y la modernización 2013–2018 (Financiado por el BID). Se profundiza en el uso de snow pillows de acero inoxidable: funcionamiento, incertidumbre (±10 mm), problemas térmicos e hidráulicos y mitigaciones (tapón térmico difusivo, membrana aluminizada). Se presenta el estado actual de comunicaciones (Inmarsat–C y Starlink) y su aporte al pronóstico de caudales.

4.2 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En provincias áridas como Mendoza, la disponibilidad hídrica durante el período prima-

5 Ing. en Electrónica y Electricidad, con la especialización en hidrología e hidráulica de ríos. Jefe División Operación y Mantenimiento del Sistema de Información Hidronivometeorológica del Departamento General de Irrigación.

vera–verano depende en gran medida del derretimiento de la nieve acumulada en las cuencas de alta montaña. La medición precisa del **Equivalente de Agua de Nieve (EAN, o Snow Water Equivalent – SWE)**, entendido como la cantidad de agua almacenada en el manto nival, constituye una herramienta fundamental para anticipar caudales, planificar la operación de embalses y optimizar la asignación del recurso en sistemas hídricos regulados.

En las cuencas de los Andes centrales, la nieve actúa como un **reservorio estacional**, modulando la oferta hídrica entre la acumulación invernal y la fusión primaveral–estival. La respuesta hidrológica del manto nival está controlada por su estructura porosa y por su evolución temporal a través de procesos de metamorfismo seco y de fusión–recongelación. Estos procesos determinan propiedades como la densidad, el tamaño de grano, la permeabilidad y el contenido de agua líquida, con efectos directos sobre la percolación, la retención y la estratigrafía del manto nival (Colbeck, 1982; Sturm et al., 1997).

Desde un punto de vista operativo, el EAN se define como la **altura de agua líquida (mm)** que resultaría de la fusión completa del manto nival sobre una superficie unitaria. Esta variable integra de manera conjunta la altura y la densidad de la nieve, y se vincula directamente con el aporte potencial durante la temporada de fusión (NRCS, s. f.).

La implementación sistemática de la medición hidronivometeorológica en la provincia de Mendoza, a través del Departamento de Hidrología del Departamento General de Irrigación y de su herramienta operativa, el **Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH)**, permitió avanzar desde la simple cuantificación del recurso hacia una comprensión más profunda de su comportamiento. En particular, el análisis continuo de datos puso en evidencia que la nieve en la cordillera de Mendoza **no se distribuye de manera homogénea**, ni en cantidad ni en calidad, ni en el tiempo ni en el espacio, aspecto central para la interpretación hidrológica y la gestión del recurso.

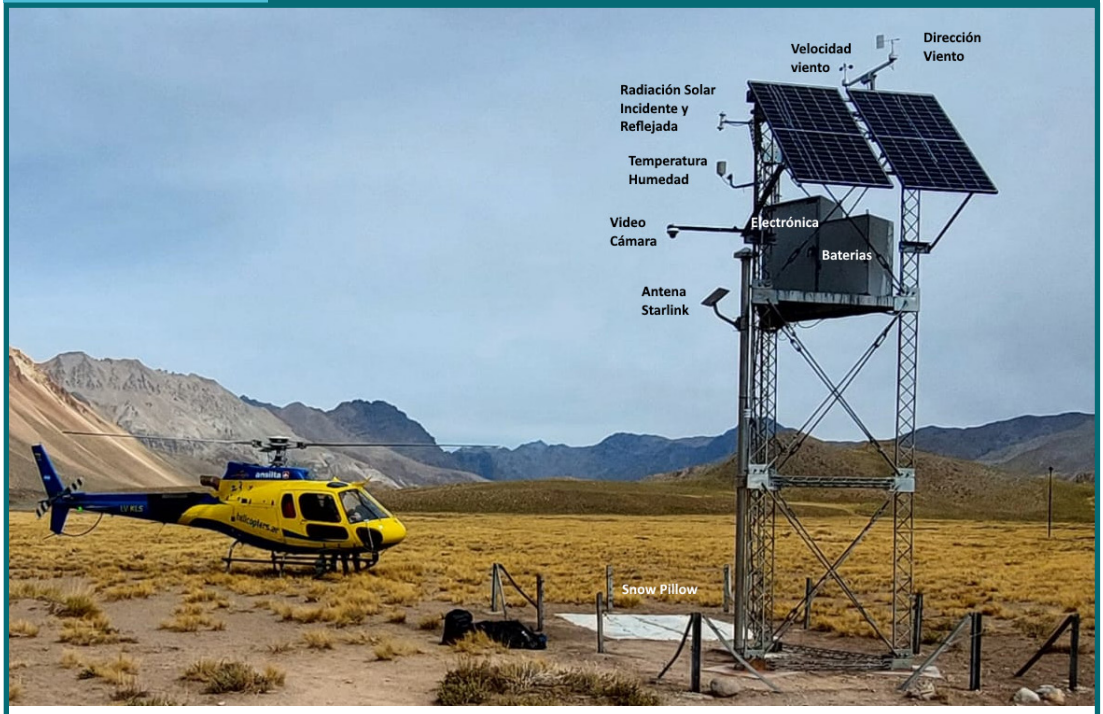
El presente capítulo se enfoca en los fundamentos conceptuales, metodológicos y operativos de la medición nival en Mendoza, sin abordar en detalle la modelación hidrológica ni la gestión institucional del recurso, aspectos desarrollados en otros capítulos del libro.

4.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y LÍNEA DE TIEMPO

- 1950–1979: cateos y observaciones en refugios de alta montaña (Valle Hermoso como hito), pluvionivómetros totalizadores y aforos. Se establecen rutinas de observación meteorológica y formatos de planillas.
- Década de 1980: Recursos Hídricos de la Nación introduce sistemas automáticos con snow pillows de formato circular, sensores de temperatura ambiente y transmisión por meteor burst. Constituye el antecedente directo de la automatización nivológica en el país.

- 1997: implementación física del SIH con financiamiento del Banco Mundial; se despliegan estaciones nivometeorológicas y enlaces satelitales como se observa en el Cuadro 4.1.
- 1998–2010: instauración de snow pillows rectangulares (acero inoxidable) y sensores complementarios; operación remota mediante Inmarsat–C. (Cuadro 3)
- 2013–2018: modernización en Toscas, Horcones y Santa Clara (financiamiento BID). En paralelo, IANIGLA moderniza y amplía su red hasta 5 estaciones con comunicaciones GOES, fortaleciendo la observación nival regional.
- 2025→: migración progresiva a Starlink (datos en tiempo real, hasta 1 s, y video), manteniendo Inmarsat–C como respaldo en sitios clave.

Cuadro 4.1 **Estación Nivometeorológica Laguna del Diamante**



Fuente: Banco de Imágenes. Departamento General de Irrigación

Esta evolución evidencia un pasaje progresivo desde observaciones aisladas hacia un sistema integrado de medición y análisis, orientado a la hidrología operativa.

4.4 MARCO CONCEPTUAL: EAN, PROCESOS Y ESTÁNDARES

4.4.1 El manto nival como reservorio hidrológico

En cuencas de alta montaña de regiones áridas y semiáridas, el manto nival constituye un **reservorio hidrológico estacional**, en el cual la precipitación sólida se almacena durante el invierno y se libera gradualmente durante el período de fusión. A diferencia de la preci-

pitación líquida, cuya respuesta hidrológica es inmediata, la nieve introduce un desacople temporal entre la entrada y la salida del sistema, modulando los caudales y reduciendo la variabilidad interanual.

Desde el punto de vista hidrológico, el interés principal no radica en la altura de la nieve, sino en la **cantidad de agua almacenada** y en la forma en que esta se libera a lo largo del tiempo.

El manto nival introduce un desacople temporal entre la precipitación y el escurrimiento, cuya magnitud depende tanto de la cantidad de nieve acumulada como de la evolución de sus propiedades físicas. Este desacople constituye uno de los principales mecanismos de regulación natural del régimen hidrológico en cuencas de montaña.

4.4.2 Propiedades físicas relevantes del manto nival

El manto nival es un medio poroso compuesto por una matriz de hielo, aire y, en determinadas condiciones, agua líquida. Su comportamiento hidrológico está controlado por un conjunto de propiedades físicas que evolucionan a lo largo del tiempo, entre las que se destacan:

- **Densidad aparente**: relación entre la masa del manto y su volumen, resultado de procesos de acumulación, compactación y metamorfismo.
- **Estructura y estratigrafía**: disposición de capas con diferente origen, granulometría y cohesión.
- **Permeabilidad**: capacidad del manto para permitir el flujo de agua líquida durante la fusión.
- **Contenido de agua líquida**: fracción de agua presente en estado líquido dentro del manto, relevante durante períodos de fusión o rehielo.

Estas propiedades no son constantes ni uniformes, y presentan una marcada variabilidad espacial y temporal, condicionada por factores meteorológicos, topográficos y por la acción del viento.

Estos conceptos, ampliamente documentados en la literatura, adquieren particular relevancia cuando se analizan a la luz de mediciones sistemáticas en ambientes áridos de montaña.

4.4.3 Equivalente de Agua en Nieve (EAN)

El **Equivalente de Agua en Nieve (EAN)**, se define como la **altura de agua líquida (mm)** que resultaría de la fusión completa del manto nival sobre una superficie unitaria. Esta variable integra de manera conjunta la altura y la densidad de la nieve, constituyéndose en la magnitud más directamente vinculada con el aporte hídrico potencial durante la temporada de fusión.

Desde un punto de vista conceptual, el EAN puede expresarse como el producto de la altura del manto por su densidad media, normalizada por la densidad del agua. En la práctica operativa, el EAN se obtiene mediante mediciones directas o indirectas de la carga ejercida por el manto nival.

4.4.4 Dinámica temporal del manto nival

El manto nival evoluciona a lo largo del período invernal mediante procesos de **metamorfismo seco** y de **metamorfismo por fusión–recongelación**, que modifican progresivamente su estructura interna y sus propiedades hidráulicas. Estos procesos determinan cambios en la densidad, la permeabilidad y la capacidad de retención de agua, afectando tanto la magnitud como el momento del aporte al escurrimiento.

La dinámica del manto nival no es uniforme ni continua, y puede presentar episodios de acumulación, compactación, fusión parcial y rehielo, incluso dentro de una misma temporada. Esta complejidad hace necesario abordar su medición e interpretación mediante un enfoque integrado, que combine observaciones puntuales, registros continuos y análisis espacial.

4.5 Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH)

4.5.1 Origen, objetivos y enfoque

El **Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH)** fue concebido como una herramienta operativa del Departamento General de Irrigación (DGI) destinada a la observación sistemática de los procesos hidrológicos y nivológicos en las cuencas de alta montaña de la provincia de Mendoza. Su implementación respondió a la necesidad de contar con información confiable, continua y oportuna para la gestión del recurso hídrico en un contexto de alta variabilidad climática y marcada dependencia del deshielo cordillerano.

Desde su origen, el SIH fue diseñado con un enfoque **integrado y operativo**, priorizando la medición de variables directamente vinculadas con la generación de escurrimientos y su disponibilidad temporal, así como la transmisión y procesamiento de los datos en plazos compatibles con la toma de decisiones.

4.5.2 Alcance territorial y red de estaciones

El SIH se despliega sobre las principales cuencas cordilleranas de la provincia de Mendoza, abarcando sectores de alta montaña donde se concentra la acumulación nival y se generan los aportes hídricos que alimentan los sistemas regulados aguas abajo. La red está compuesta por estaciones nivometeorológicas estratégicamente ubicadas, con criterios de representatividad hidrológica, accesibilidad operativa y continuidad histórica.

La selección de los sitios de instalación considera factores topográficos, exposición, régimen de vientos y estabilidad del terreno, buscando capturar condiciones representativas del entorno nival de cada cuenca, aun reconociendo la heterogeneidad espacial inherente al manto de nieve.

4.5.3 Variables observadas y resolución temporal

El SIH registra de manera sistemática un conjunto de variables nivometeorológicas clave, entre las que se incluyen el **Equivalente de Agua en Nieve (EAN)**, la altura de nieve y variables meteorológicas asociadas, tales como temperatura del aire, temperatura del suelo, humedad, viento y radiación.

Las estaciones operan con **resoluciones temporales horarias o subdiarias**, a partir de las cuales se derivan valores diarios de máximos, mínimos y promedios. Esta resolución permite analizar tanto la evolución estacional del manto nival como los procesos de corta duración asociados a eventos individuales de nevada, fusión o rehielo.

4.5.4 Flujo de datos y arquitectura del sistema

Desde el punto de vista funcional, el SIH integra las etapas de **adquisición, transmisión, almacenamiento, control de calidad y procesamiento** de los datos. La información registrada en las estaciones es transmitida de forma remota hacia los centros de operación del DGI, donde se almacena en bases de datos centralizadas y se somete a procedimientos de validación y control.

La arquitectura del sistema ha evolucionado a lo largo del tiempo, incorporando distintas tecnologías de transmisión satelital y adaptándose a las restricciones propias de ambientes de alta montaña. Esta evolución permitió mejorar la confiabilidad del sistema y reducir la latencia entre la medición en campo y la disponibilidad de la información para uso operativo.

4.5.5 Operación en tiempo real y productos operativos

Un rasgo distintivo del SIH es su orientación a la **operación en tiempo real**. La disponibilidad diaria (y en etapas recientes, casi instantánea) de los datos nivometeorológicos posibilita la elaboración de productos operativos destinados a la gestión del recurso hídrico, entre los que se destaca el **Boletín de Información Hidronivometeorológico**, publicado de manera regular por el DGI.

En este sentido, el SIH no debe entenderse únicamente como una red de medición, sino como un sistema de soporte a la decisión, donde la oportunidad, consistencia y contextualización de la información resultan tan relevantes como la medición en sí misma.

En la práctica, esta disponibilidad temprana de información ha demostrado ser más valiosa para la toma de decisiones que la precisión obtenida con datos publicados con meses de retraso.

4.5.6 Transición entre sistema y métodos

La implementación del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) requiere la integración de **métodos de medición complementarios**, capaces de capturar la complejidad espacial y temporal del manto nival en alta montaña. Ningún método, por sí solo, resulta suficiente para describir de manera completa la acumulación, la evolución y la fusión de la nieve.

Por esta razón, el SIH se apoya en un **conjunto articulado de técnicas de medición**, que incluyen observaciones manuales, sensores automáticos y herramientas de validación independiente. Cada uno de estos métodos aporta información en una escala temporal y espacial diferente, y cumple un rol específico dentro del sistema: caracterización física, medición continua del EAN, control de calidad y contextualización espacial.

En el capítulo siguiente se describen los principales métodos de medición utilizados por el SIH, así como su función dentro de un enfoque integrado orientado a la hidrología operativa.

4.6 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA NIEVE

La medición del manto nival en el marco del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) se basa en la **integración de métodos complementarios**, diseñados para capturar tanto la estructura física del manto como su evolución temporal y su contenido de agua equivalente. La combinación de observaciones manuales y sensores automáticos permite abordar la heterogeneidad espacial y temporal característica de la nieve en ambientes de alta montaña.

En este contexto, los métodos manuales cumplen una función de **caracterización y validación**, mientras que los métodos automáticos proporcionan registros continuos del Equivalente de Agua en Nieve (EAN) y de variables meteorológicas asociadas. La descripción de estos métodos se presenta a continuación, destacando su rol específico dentro del sistema.

Dado que todos los sensores automáticos miden en un punto, la representatividad espacial de la medición constituye una consideración central en la interpretación de los datos, especialmente en un sistema nival heterogéneo.

4.6.1 Métodos manuales: cateos y calicatas

Los métodos manuales constituyen la forma histórica y fundamental de medición del manto nival en alta montaña. En el marco del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH), los cateos y las calicatas no se utilizan como única fuente de información, sino como herramientas de **caracterización física y validación** de los sistemas automáticos.

Estos métodos permiten obtener información directa sobre la estructura del manto, su densidad y su contenido de agua, variables que no pueden ser completamente inferidas a partir de sensores automáticos.

4.6.1.1 Objetivo y alcance

El objetivo principal de los cateos y calicatas es caracterizar el estado del manto nival en un momento determinado del período invernal, proporcionando información puntual pero de alta calidad física. En el SIH, estas mediciones se utilizan principalmente para:

- validar los registros de EAN obtenidos por snow pillows,
- evaluar la representatividad del sitio de medición,
- analizar la calidad y estratigrafía del manto nival,
- y mejorar la interpretación de las series automáticas.

Su alcance es necesariamente limitado en el tiempo y el espacio, razón por la cual se integran dentro de un sistema multiescala de observación.

4.6.1.2 Cateos de nieve

El cateo de nieve consiste en la extracción de un cilindro de nieve de sección conocida a lo largo de todo el espesor del manto, desde la superficie hasta el suelo. A partir del peso del cilindro se calcula el contenido de agua equivalente (EAN), mediante la relación entre masa, área y densidad del agua.

En el ámbito del SIH, los cateos se realizan durante campañas nivológicas programadas, generalmente coincidentes con el máximo de acumulación invernal. La metodología empleada busca minimizar sesgos asociados a la heterogeneidad espacial del manto, mediante la realización de múltiples mediciones en el entorno de la estación automática.

4.6.1.3 Calicatas nivológicas

Las calicatas consisten en la excavación manual de un pozo vertical en el manto nival, permitiendo observar directamente su estratigrafía. A través de este método se analizan:

- capas de acumulación sucesivas,
- variaciones de densidad,
- presencia de costras de rehielo,
- gradientes térmicos,
- y condiciones de cohesión del manto.

La información obtenida resulta clave para interpretar diferencias en la respuesta de los sensores automáticos y para comprender procesos de compactación y metamorfismo que influyen en la evolución del EAN.

4.6.1.4 Rol de los métodos manuales dentro del SIH

Desde un punto de vista técnico, los cateos y calicatas deben entenderse como mediciones de referencia, no como sistemas de monitoreo continuo. Su valor reside en la calidad física de la información obtenida y en su función de validación y control de los sistemas automáticos.

Integrados con sensores continuos, imágenes satelitales y observación mediante cámaras de video, los métodos manuales contribuyen a una interpretación robusta del manto nival y a una mejor comprensión de su dinámica espacial y temporal.

4.6.2 Cateo de nieve con sonda Mount Rose, procedimiento y cálculo de EAN

Instrumento: cateador (sonda) Mount Rose

El cateador Mount Rose es un muestreador tubular metálico de sección transversal conocida, diseñado para extraer un "testigo" (cilindro) de nieve a lo largo de todo el espesor del manto, desde superficie hasta suelo. Su uso permite estimar el Equivalente de Agua en Nieve (EAN / SWE) mediante el peso del testigo extraído, en el Cuadro 4.2 se observa un detalle de los elementos utilizados para las actividades de cateos y calicatas.

Cuadro 4.2 Instrumental de cateo nivológico utilizado en campañas de medición manual



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Nota: se observan dos juegos de tubos de cateo de acero inoxidable (longitud unitaria 1 m, acople roscado), trépanos de corte para nieve y hielo, balanza mecánica de resorte utilizada históricamente para la determinación de masa, jalón de referencia y recipiente para descarga de muestras. En la actualidad, el procedimiento se mantiene, incorporando balanzas electrónicas portátiles que permiten la pesada directa del tubo lleno y vacío, reduciendo pérdidas de material y mejorando la precisión operativa.

Componentes típicos del sistema:

- Tubo muestreador (cuerpo principal) con borde de corte inferior.
- Tramos roscados o acoplables (para aumentar longitud).
- Empuñadura superior.

- Balanza portátil (preferentemente con precisión de 10 g o mejor).
- Accesorios: escobilla/raspador para limpieza del tubo y bolsa para transporte.

Consideración operativa: el tubo debe mantenerse limpio para evitar adherencia de nieve húmeda, que introduce sesgo positivo en el peso del testigo y, por ende, en el EAN.

Procedimiento paso a paso (cateo estándar SIH)

Objetivo: obtener EAN representativo del entorno de la estación y/o validar sensores automáticos (snow pillow/balanza).

1. **Selección de puntos**

- Definir una zona representativa y sin perturbaciones recientes (pisadas, viento remolino, sombra artificial).
- Realizar múltiples cateos (mínimo 4) alrededor de la estación, y opcionalmente 1 cateo cercano al sensor (según objetivo de validación).

2. **Medición del espesor de nieve (h)**

- Insertar el cateador verticalmente hasta contactar suelo (cambio de resistencia claro).
- Registrar el espesor total (h, en cm o mm).

3. **Extracción del testigo**

- Extraer el tubo con el testigo completo.
- Para evitar la pérdida de material del extremo inferior, se debe formar un tapón de suelo o barro.

4. **Pesada**

- Pesar el testigo con balanza portátil y registrar la masa total mmm (en g o kg).
- Si se utiliza bolsa/recipiente, aplicar tara.

5. **Limpieza**

- Limpiar el tubo (interior y borde) antes del cateo siguiente para evitar acumulación adherida.

6. **Registro de condiciones**

- Registrar fecha/hora, ubicación, observaciones de calidad de nieve (seca/húmeda, presencia de costras, granos, viento, etc.).

Consideraciones sobre el muestreo y el tratamiento de los datos de cateo

En cada punto de muestreo definido alrededor de la estación nivometeorológica, no se realiza una única medición, sino **múltiples cateos independientes**. En la práctica operativa del SIH, en cada punto se efectúan **entre tres y cuatro cateos**, cuyos resultados se registran individualmente en la planilla de campaña.

Posteriormente, los valores de EAN obtenidos en esos cateos se **promedian**, obteniéndose un valor representativo del punto de muestreo. De este modo, cada punto queda caracterizado por un **promedio de al menos tres cateos**, lo que permite reducir la influencia de la variabilidad local del manto nival asociada a microrelieve, redistribución por viento y heterogeneidades de compactación.

Este procedimiento se repite para todos los puntos definidos en el entorno de la estación, y los valores resultantes se utilizan para el análisis comparativo con los registros automáticos.

Criterio de repetición espacial y consistencia histórica

Un aspecto metodológico central del sistema es que los **puntos de cateo se mantienen constantes en el tiempo.** Desde el inicio sistemático de las campañas nivológicas, alrededor del año 2000, los cateos se realizan **siempre en los mismos puntos de referencia**, salvo que condiciones excepcionales obliguen a un leve ajuste.

Esta continuidad espacial permite construir **series históricas comparables**, minimizando sesgos asociados a cambios en la localización del muestreo. En consecuencia, las variaciones observadas en los valores de EAN responden principalmente a cambios reales en la acumulación nival y no a modificaciones en la metodología de medición.

Cálculo teórico del EAN a partir de un proceso de cateo

El **EAN** se obtiene como la altura de agua equivalente (mm) contenida en el testigo extraído:

$$EAN = \frac{m}{\rho_{agua} * A}$$

donde:

- $m = masa\ del\ testigo\ (kg)$
- $\rho_{agua} = densidad\ del\ agua\ (1000\ kg/m^3)$
- $A = área\ interna\ del\ cateador\ (m^2)$

Ejemplo numérico (valores ilustrativos):

- $Diámetro\ interno\ del\ cateador$: $D = 4{,}0\ cm = 0{,}040\ m$
- Área:

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi * (0{,}020)^2 = 0{,}001257\ m^2$$

- Masa medida del testigo: $m = 1{,}10\ kgm$

Entonces:

$$EAN = \frac{1{,}1}{1000 \times 0{,}001257} = 0{,}875\ m = 875\ mm$$

Interpretación: el testigo representa un EAN de 875 mm, es decir, si esa nieve se fundiera, produciría 875 mm de agua.

Nota técnica: si además se midió el espesor h, puede estimarse densidad media:

$$\rho^{nieve} = \rho_{agua} * \frac{EAN}{h}$$

(con EAN y h en unidades coherentes)

Ejemplo aplicado de cálculo del EAN a partir de mediciones de campo

El Cuadro 4.3 presenta una planilla real de registro correspondiente a un cateo nivológico efectuado en alta montaña, donde se documentan las variables primarias necesarias para el cálculo del Equivalente de Agua en Nieve (EAN). Esta planilla sintetiza el procedimiento operativo completo: medición de profundidad total del manto, longitud efectiva del núcleo extraído, determinación de la masa de nieve contenida en el tubo cateador y cálculo derivado de densidad y contenido de agua equivalente.

Cada columna representa una etapa del proceso físico de medición y su posterior transformación en variable hidrológica. Mientras que los registros de profundidad y masa constituyen observaciones directas de campo, los valores de densidad y EAN corresponden a resultados obtenidos mediante cálculo a partir de dichas mediciones.

El parámetro de interés final es el contenido de agua expresado en milímetros (columna 9), ya que este valor representa la lámina de agua potencial disponible para escurrimiento durante el período de fusión. Sin embargo, para comprender su obtención y evaluar su consistencia, resulta necesario detallar el procedimiento matemático que vincula las mediciones primarias con el resultado final.

En las secciones siguientes se desarrolla el cálculo completo del EAN utilizando los valores registrados en el Cuadro 4.1, incluyendo la determinación del volumen muestreado, la densidad media del núcleo y la validación de los resultados en el marco del control de calidad (QA/QC) y su aplicación en el Pronóstico de Escurrimientos.

Cómo se obtiene la columna (9) a partir de los datos medidos

La columna (9) sale directamente de la masa de nieve extraída (col. 7) y el área del cateador.

Dato fijo del cateador

- Área = 11,03 cm²

Dato medido

- Masa de nieve mmm en **gramos** (col. 7)

Como 1 g/cm² equivale a 1 cm de agua, el EAN en mm queda:

$$EAN\ (mm) = \frac{m\ (g)}{A\ (cm^2)} \times 10$$

Cuadro 4.3 Ejemplo de una planilla de registro de cateos de nieve (formato SIH)

CATEOS DE NIEVE

Fecha: #######
Estación: VALLE HERMOSO
Hora salida transp 8:30
Hora llegada estac 10:50
Hora salida Estación:
Hora llegada transporte:
Operadores:

Temperatura ambiente : 7°C
mm Equivalentes SIH : 316 a las 14hs.
Viento : CALMO
Area tubo cateo: 11,03 cm2
Peso Cateador: 3,905 grs

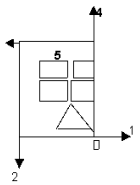
Suelo húmedo
Nieve firme a blanda

CATEO	PROFUNDIDAD NIEVE (cm)	LONGITUD NUCLEO (cm)	LONGITUD BARRO (cm)	PROFUNDIDAD FINAL NIEVE (cm)	PESO TOTAL (gr)	PESO CATEADOR (gr)	PESO NIEVE (gr)	DENSIDAD (gr/cm3)	CONTENIDO DE AGUA (mm)	TEMPERATURA BARRO (°C)	TEMPERATURA NUCLEO (°C)	TEMPERATURA PELO NIEVE (°C)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(A)	(B)	(C)	(D)
1	84,0	78,0	5,5	78,5	4275	3905	370	0,427	335	1,4	0,9	1	7
2	73,0	68,0	5	68,0	4210	3905	305	0,407	277	0,7	0,6	0,6	9
3	79,0	67,0	5,6	73,4	4255	3905	350	0,432	317	0,5	0,3	0,8	9
4	73,0	63,0	5,5	67,5	4230	3905	325	0,437	295	0,2	0,0	0,2	9
5	79,5	73,0	7,2	72,3	4270	3905	365	0,458	331	0,1	0,2	0,2	9
Promedio	77,7	69,8	5,8	71,9	4248	3905	343	0,432	311	0,6	0,4	0,6	8,6

Peso de la Nieve (7) = Peso Total (5) - Peso cateador (6)

Densidad (8) = Peso de la nieve (7) / Profundidad Final de la Nieve (4) / área cateador

E.A.N.(9) = Profundidad Final de la Nieve (4) * 10 * Densidad (8)



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Procesos como se realizan los cálculos aplicando el Cuadro 4.1

$$Uso\ Área\ cateador = 11{,}03\ cm^2$$

Cateo 1: $EAN = \frac{370}{11.3} * 10 = 335.4 \approx 335\ mm$

Cateo 2: $EAN = \frac{305}{11.3} * 10 = 276.5 \approx 277\ mm$

Cateo 3: $EAN = \frac{350}{11.3} * 10 = 317.3 \approx 317\ mm$

Cateo 4: $EAN = \frac{325}{11.3} * 10 = 294.47 \approx 295\ mm$

Cateo 5: $EAN = \frac{365}{11.3} * 10 = 330.8 \approx 331\ mm$

Promedio: $EAN_{prom} = 335 + 277 + 317 + 295 + 3315 = 311\ mmEAN$

Interpretación de la densidad (columna 8) y su relación con el EAN

La densidad media de la nieve (columna 8), expresada en g/cm³, se calcula a partir de la masa extraída y el volumen correspondiente al núcleo muestreado. Este parámetro no constituye el resultado operativo final, pero cumple un rol fundamental en la caracterización física del manto nival. En el ejemplo presentado, los valores individuales de densidad (0,427; 0,407; 0,432; 0,437 y 0,458 g/cm³) arrojan un promedio de 0,432 g/cm³, equivalente a 432 kg/m³, lo que indica un manto de nieve moderadamente compactado, típico de etapas avanzadas del invierno.

Mientras que el EAN (columna 9) representa la variable hidrológicamente relevante —es decir, la lámina de agua potencialmente disponible al fundirse el manto—, la densidad permite interpretar el estado evolutivo de la nieve (grado de metamorfismo, compactación, presencia de capas de hielo) y actúa como herramienta de control de calidad (QA/QC). Valores anómalos de densidad pueden indicar errores de muestreo, penetración incompleta del tubo o presencia de vacíos internos, por lo que su análisis complementa y valida el EAN calculado.

Aplicación operativa del método de cateos en terreno

El desarrollo precedente ha mostrado el procedimiento matemático mediante el cual las mediciones de campo se transforman en valores de Equivalente de Agua en Nieve (EAN). Sin embargo, detrás de cada valor registrado en la planilla existe una secuencia operativa cuidadosamente estandarizada, cuya correcta ejecución resulta determinante para la calidad del resultado final.

El Cuadro 4.3 ilustra el procedimiento completo de cateo nivológico realizado en alta montaña, desde la preparación del sitio hasta el registro final de los datos. Este método constituye la base histórica de las campañas nivológicas en Mendoza y continúa siendo una herramienta fundamental tanto para la caracterización espacial del manto nival como para la validación de sensores automáticos.

En términos operativos, el procedimiento comprende:

- selección de un punto representativo del entorno,
- medición del espesor total del manto,
- extracción del núcleo mediante tubo cateador,
- verificación de que se ha alcanzado la base del manto,
- determinación de la masa de nieve contenida en el tubo,
- registro sistemático de los valores obtenidos.

La secuencia ilustrada en el Cuadro 4.3 permite visualizar cada una de estas etapas y comprender cómo las variables primarias (profundidad y masa) se transforman posteriormente en densidad y contenido de agua equivalente, tal como se desarrolló en el ejemplo numérico anterior.

Cuadro 4.4 **Procedimiento de cateos**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

De este modo, en el Cuadro 4.4 no sólo cumple una función descriptiva del procedimiento, sino que aporta contexto operativo al cálculo presentado en la sección precedente, reforzando la trazabilidad entre medición en terreno y resultado hidrológico final.Nota: procedimiento de cateo nivológico realizado en alta montaña. (a) Vista general del equipo de trabajo y del entorno de medición; (b) inserción de la sonda de cateo para la determinación del espesor del manto nival; (c) muestra extraída del manto de nieve y hielo, donde el tapón de material del suelo indica que la extracción ha alcanzado la base del manto; (d) instrumental asociado a la medición, incluyendo la determinación de la temperatura del núcleo de nieve; (e) pesada de la muestra y registro de datos. Este método permite estimar el Equivalente de Agua en Nieve (EAN) a partir de mediciones puntuales de espesor y densidad, y es ampliamente utilizado para caracterizar la variabilidad espacial del manto nival y validar mediciones automáticas.

4.6.3 Calicatas nivológicas: análisis estructural y térmico del manto nival

Objetivo del método

La calicata nivológica (Cuadro 4.5) consiste en la excavación manual de un pozo vertical en el manto nival, que permite observar y analizar directamente su estructura interna.

Cuadro 4.5 Calicata nivológica y caracterización estratigráfica del manto de nieve



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Nota: calicata nivológica realizada en alta montaña para la caracterización del manto de nieve. (a) Vista general del pozo de calicata, la estación de medición y el entorno de alta montaña; (b) muestreo estrato por estrato mediante pala calibrada para la obtención de muestras representativas; (c) identificación del perfil estratigráfico del manto nival; (d) medición del tamaño de los granos de nieve y hielo. Este procedimiento permite analizar la estructura, evolución y calidad del manto nival, y constituye una referencia fundamental para la interpretación del Equivalente de Agua en Nieve (EAN) y la validación de mediciones automáticas.

A diferencia del cateo, cuyo objetivo principal es cuantificar el Equivalente de Agua en Nieve (EAN), la calicata se orienta a la caracterización física y cualitativa del manto.

En el marco del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH), las calicatas se utilizan como herramienta complementaria para interpretar la respuesta de los sensores automáticos y comprender los procesos que controlan la evolución del manto nival.

Procedimiento general

La ejecución de una calicata se realiza en un sitio representativo del entorno de la estación nivometeorológica, evitando zonas perturbadas por pisadas, acumulaciones artificiales o efectos locales del viento.

El procedimiento estándar comprende:

a) Excavación del pozo

- Excavación vertical hasta alcanzar el suelo.
- Ancho suficiente para permitir la observación y el trabajo seguro.
- Orientación preferente del frente de observación hacia el sur, minimizando la incidencia directa de la radiación solar.

b) Preparación del perfil

- Limpieza del frente de la calicata para definir claramente las capas.
- Eliminación de irregularidades producidas durante la excavación.

c) Descripción estratigráfica

- Identificación visual de capas sucesivas de acumulación.
- Reconocimiento de cambios de textura, granulometría y cohesión.
- Detección de costras de rehielo, capas de hielo o nieve húmeda.

d) Medición térmica

- Registro de la temperatura del manto en distintos niveles, desde superficie hasta suelo.
- Evaluación de gradientes térmicos verticales.

e) Observaciones complementarias

- Presencia de humedad libre.
- Evidencias de metamorfismo (redondeamiento de granos, recristalización).
- Influencia del viento (capas erosionadas o compactadas).

Información obtenida

A partir de una calicata nivológica es posible obtener:

- Estructura estratigráfica del manto nival.
- Evolución de la densidad relativa entre capas.
- Indicadores de estabilidad del manto.
- Evidencia de procesos de compactación, fusión y rehielo.
- Condiciones térmicas que explican la respuesta de sensores automáticos (snow pillows y sensores de altura).

Esta información resulta clave para interpretar situaciones en las que los registros automáticos muestran comportamientos atípicos o no lineales.

Rol de las calicatas dentro del SIH

Desde un punto de vista técnico, las calicatas no constituyen un método de monitoreo continuo, sino una herramienta de diagnóstico estructural del manto nival. Su valor reside en la capacidad de:

- contextualizar los valores de EAN medidos automáticamente,
- explicar diferencias entre estaciones cercanas,
- interpretar la influencia de la calidad de la nieve sobre la medición,
- y comprender la dinámica interna del manto frente a cambios meteorológicos.

Integradas con cateos, sensores automáticos, imágenes satelitales y cámaras de video, las calicatas aportan una visión tridimensional del sistema nival, reforzando la interpretación técnica de los datos y la confiabilidad del sistema en su conjunto.

Consideración operativa

Las calicatas se realizan de manera selectiva, en campañas programadas, priorizando momentos clave del invierno (máxima acumulación o inicio del período de fusión). Su ejecución requiere condiciones de seguridad adecuadas y personal capacitado, dado el entorno de alta montaña en el que se desarrollan.

4.6.4 Snow pillows: medición continua del Equivalente de Agua en Nieve (EAN)

Principio de funcionamiento

El *snow pillow* es un sensor diseñado para medir de forma continua el **Equivalente de Agua en Nieve (EAN)** a partir de la carga ejercida por el manto nival acumulado sobre una superficie flexible de área conocida. El sistema se basa en el principio de transmisión hidrostática de presión: el peso de la nieve se transmite a un fluido confinado dentro del pillow, generando una presión proporcional a la masa acumulada.

En las estaciones del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH), el snow pillow está conectado a una **columna de fluido anticongelante (habitualmente alcohol)** y a un **transductor de presión**, que convierte la señal mecánica en una señal eléctrica continua, registrada con resolución horaria o diaria.

De este modo, el sensor no mide directamente la altura de nieve ni su densidad, sino el **contenido de agua equivalente**, variable hidrológicamente relevante.

Configuración del sistema en estaciones del SIH

El sistema completo de medición incluye:

- Snow pillow de superficie conocida, instalado al nivel del suelo.
- Columna hidráulica de fluido transmisor.
- Transductor de presión con rango acorde a las máximas acumulaciones esperadas.
- Datalogger con registro continuo y transmisión remota.
- Sensor de temperatura del suelo asociado, utilizado para interpretación de estados de cobertura.

La instalación se realiza sobre una superficie preparada y nivelada, con el objetivo de garantizar un contacto uniforme entre el manto nival y el pillow.

Interpretación de la señal y cálculo del EAN

La señal registrada por el transductor de presión se convierte en valores de EAN mediante una relación directa entre presión y carga, considerando el área efectiva del pillow y la densidad del fluido transmisor. El sistema entrega valores de EAN expresados en milímetros de agua equivalente, correspondientes a la carga total ejercida por la nieve acumulada.

En condiciones ideales, el incremento del EAN refleja directamente la acumulación de nieve, mientras que los descensos responden a procesos de fusión, compactación o pérdida de masa.

Fuentes de incertidumbre y limitaciones

Si bien los snow pillows constituyen una de las herramientas más robustas para la medición continua del EAN, su señal puede verse afectada por diversos factores:

- **Efectos térmicos**: variaciones de temperatura del suelo y del fluido transmisor.
- **Microrelieve y heterogeneidad del manto**: redistribución por viento, formación de costras o puentes.
- **Interacciones mecánicas**: fricción lateral, tensiones diferenciales y asentamientos no uniformes.
- **Procesos internos del manto**: compactación progresiva y rehielos parciales.

En la práctica operativa del SIH, estas fuentes de error se traducen en una **incertidumbre típica del orden de ±10 mm de EAN**, valor que se considera aceptable para aplicaciones hidrológicas operativas.

Medidas de mitigación implementadas

Con el objetivo de reducir los efectos térmicos y mejorar la estabilidad de la señal, en las estaciones del SIH se han incorporado medidas específicas, entre ellas:

- **Aislamiento térmico del conjunto**, mediante materiales y configuraciones ciones que reducen la influencia de la temperatura del suelo.
- **Membrana aluminizada** sobre el pillow, destinada a minimizar la absorción de radiación solar y las variaciones térmicas diurnas.
- Protocolos de mantenimiento y verificación durante campañas de campo.

Estas medidas han permitido mejorar la consistencia de las series temporales y facilitar la interpretación de la señal en períodos de transición (inicio y fin de la temporada nival).

Validación con mediciones independientes

Los registros de snow pillows se validan sistemáticamente mediante:

- cateos de nieve en campañas nivológicas,
- calicatas para análisis estructural,
- comparación con sensores de altura de nieve,
- análisis de imágenes satelitales,
- observación directa a través de cámaras de video.

Este enfoque multifuente permite identificar desviaciones, confirmar tendencias y aumentar la confiabilidad de la información utilizada en la hidrología operativa.

Rol del snow pillow dentro del SIH

Desde el punto de vista técnico, el snow pillow constituye el sensor clave para la estimación continua del EAN en alta montaña. Su principal fortaleza es la generación de series temporales completas, que permiten analizar la dinámica de acumulación y fusión del manto nival y alimentar modelos de pronóstico de escurrimientos.

No obstante, su correcta interpretación requiere siempre del apoyo de mediciones manuales y observaciones complementarias, enmarcando su uso dentro de un sistema integrado de medición.

En el Cuadro 4.6 se observa las dos tecnologías de snow pillows ampliamente utilizada en la cordillera mendocina, la imagen de la izquierda es el modelo típico utilizado por la Nación en sus mediciones nivológicas, en el Cuadro del centro, los snow pillows utilizados por el SIH donde se observan descubiertos, debido a los inconvenientes que se producen por efecto de la radiación solar, se protegieron con membrana asfáltica, como se observa en la fotografía de la derecha, ampliando su vida útil por más de 20 años.

Cuadro 4.6 **Tipos de snow pillows y Sistema de protección**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Nota: la primera balanza fue instalada en abril 2015 en la estación Toscas, nacientes del Río Mendoza, la segunda en la estación Horcones en enero de 2016, y en Diamante en diciembre de 2025.

4.6.5 Balanza de nieve (*snow scale*): medición directa de carga nival

Principio de funcionamiento

La balanza de nieve (*snow scale*) es un sistema de medición diseñado para registrar de manera directa la **carga ejercida por el manto nival** sobre una plataforma rígida instrumentada con celdas de carga, ver Cuadro 4.7. A diferencia del snow pillow, que transmite la presión a través de un fluido, la balanza mide directamente la fuerza vertical aplicada sobre la superficie sensible.

La señal generada por las celdas de carga se convierte en valores de **Equivalente de Agua en Nieve (EAN)**, permitiendo obtener una estimación continua del contenido de agua del manto acumulado.

Configuración del sistema

Una balanza de nieve típica instalada en el marco del SIH está compuesta por:

- Plataforma rígida de área conocida.
- Una o varias celdas de carga calibradas.
- Estructura de apoyo anclada al terreno.
- Sistema de adquisición de datos y transmisión remota.
- Sensor de temperatura asociado para control e interpretación.

La plataforma se instala al nivel del suelo y se prepara el entorno inmediato para reducir efectos de borde y acumulaciones artificiales.

Cuadro 4.7 **Balanza (Snow Scale) instalada en las estaciones nivometeorológicas de Horcones, Toscas y Laguna del Diamante.**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Interpretación de la señal

La balanza mide directamente la carga total del manto nival sobre su superficie. El EAN se obtiene a partir de la relación entre fuerza medida, área de la plataforma y gravedad. En condiciones ideales, la señal refleja fielmente los incrementos y disminuciones de masa asociados a acumulación y fusión.

En comparación con los snow pillows, las balanzas presentan:

- menor sensibilidad a efectos térmicos del fluido,
- respuesta más directa a la carga aplicada,
- mayor robustez conceptual desde el punto de vista mecánico.

Limitaciones operativas

A pesar de sus ventajas, las balanzas de nieve presentan también limitaciones:

- **Efectos de borde**: redistribución del manto por viento en los límites de la plataforma.
- **Interacción con el suelo**: asentamientos diferenciales o deformaciones del soporte.
- **Representatividad espacial**: al igual que otros sensores puntuales, miden un área limitada.
- **Complejidad estructural**: mayor peso y requerimientos de instalación.

Por estas razones, en el SIH las balanzas se utilizan principalmente como **sitios testigo**, complementando a los snow pillows.

Rol de las balanzas dentro del SIH

Desde el punto de vista técnico, las balanzas de nieve cumplen una función clave de **validación independiente** de los registros de snow pillows. La comparación entre ambos sistemas permite:

- evaluar sesgos sistemáticos,
- identificar efectos térmicos o hidráulicos en los pillows,
- mejorar la interpretación del EAN medido automáticamente.

Su incorporación fortalece la confiabilidad del sistema y aporta redundancia instrumental, condición fundamental para la hidrología operativa.

4.6.6 Modernización del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH)

Evolución tecnológica del SIH

Desde su implementación inicial a fines de la década de 1990, el SIH ha experimentado un proceso continuo de modernización, orientado a mejorar la **calidad de los datos**, la **confiabilidad operativa** y la **disponibilidad en tiempo real** de la información.

Este proceso no implicó un reemplazo abrupto de tecnologías, sino una **integración progresiva** de nuevos componentes sobre la base de la experiencia operativa acumulada.

Modernización de la transmisión de datos

En sus primeras etapas, el sistema utilizó tecnologías de transmisión satelital de baja tasa (por ejemplo, Inmarsat-C), adecuadas para el envío diario de datos resumidos. Con el aumento de la demanda operativa y la necesidad de mayor resolución temporal, se incorporaron progresivamente sistemas de transmisión más robustos.

En la etapa más reciente, la adopción de **enlaces satelitales de alta capacidad (Starlink)** ha permitido:

- transmisión de datos en tiempo casi real,
- acceso remoto a estaciones para diagnóstico,
- integración de cámaras de video,
- reducción de pérdidas de información durante eventos extremos.

Modernización del suministro energético

La modernización del SIH incluyó mejoras sustanciales en los sistemas de energía, mediante:

- optimización de paneles solares,
- incorporación de bancos de baterías de mayor capacidad,
- adecuación del consumo de los sensores y sistemas de comunicación.

Estas mejoras resultan críticas en ambientes de alta montaña, donde las condiciones invernales imponen largos períodos de baja radiación solar.

Incorporación de nuevas capacidades de observación

La modernización del sistema no se limitó a la instrumentación tradicional. En los últimos años se incorporaron:

- **cámaras de video** para observación en tiempo real de nevadas, acumulación y transporte eólico,
- mayor integración con **imágenes satelitales**,
- mejoras en los sistemas de almacenamiento y procesamiento de datos.

Estas capacidades ampliaron el enfoque del SIH, que pasó de medir variables aisladas a **observar e interpretar procesos**.

Impacto de la modernización en la operación hidrológica

Desde un punto de vista técnico-operativo, la modernización del SIH permitió:

- reducir la latencia entre medición y disponibilidad de datos,
- mejorar la detección temprana de eventos críticos,
- fortalecer la elaboración diaria del Boletín Hidronivometeorológico,
- consolidar al DGI como gestor de información para la hidrología operativa en tiempo real.

La incorporación de balanzas de nieve y la modernización integral del SIH reflejan un cambio de paradigma: **de un sistema de medición a un sistema de observación y comprensión de la dinámica nival**, integrando múltiples sensores, escalas temporales y fuentes de información.

4.6.7 Uso del EAN en la elaboración del Pronóstico de Escurrimientos

La información de Equivalente de Agua en Nieve (EAN) obtenida a través de cateos, calicatas y estaciones automáticas constituye uno de los insumos fundamentales para la elaboración del Pronóstico de Escurrimientos de la provincia. A partir de la estimación del volumen de agua almacenado en el manto nival al final del período de acumulación, se desarrollan correlaciones estadísticas y modelos de regresión que permiten anticipar los caudales de deshielo durante la temporada primavera–verano.

Este proceso integra la información nivológica con variables meteorológicas y antecedentes hidrológicos, configurando un esquema operativo que vincula directamente la medición en alta montaña con la planificación de embalses y la gestión del recurso hídrico en cuencas reguladas.

4.7 VALIDACIÓN MULTIFUENTE DEL MANTO NIVAL

4.7.1 Principios de validación en hidrología nival

La medición del manto nival en ambientes de alta montaña está sujeta a múltiples fuentes de incertidumbre, asociadas tanto a la instrumentación como a la variabilidad natural del sistema. En este contexto, la validación de los datos no puede basarse en un único método de referencia, sino que requiere la **integración de múltiples fuentes de información**.

En la práctica del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH), la validación se concibe como un proceso continuo, orientado a evaluar la **consistencia física y temporal** de los registros, más que a la obtención de coincidencias exactas entre métodos.

En este marco, la validación no implica forzar la coincidencia entre métodos, sino evaluar la coherencia física de la información y comprender el origen de las discrepancias observadas.

4.7.2 Validación con mediciones manuales

Las mediciones manuales mediante cateos y calicatas constituyen la referencia directa para la validación de los registros automáticos de Equivalente de Agua en Nieve (EAN). Estas campañas permiten contrastar los valores registrados por snow pillows y balanzas de nieve con mediciones independientes realizadas en el entorno inmediato de la estación.

Dado el carácter puntual de los cateos y la heterogeneidad espacial del manto nival, la validación no se basa en la coincidencia exacta de valores, sino en la coherencia entre órdenes de magnitud, tendencias y rangos esperables. Las diferencias observadas se interpretan a la luz de la variabilidad local del manto, del microrelieve y de los efectos del viento.

4.7.3 Validación mediante imágenes satelitales

Las imágenes satelitales constituyen una herramienta fundamental para la validación espacial de la información registrada en estaciones puntuales. Su principal aporte es permitir verificar la **presencia o ausencia de cobertura nival**, así como analizar la extensión y distribución del manto en sectores de llanos, valles y zonas de mayor altitud.

En el SIH, el análisis de series temporales de imágenes satelitales se utiliza para contextualizar los registros automáticos, identificar patrones regionales de acumulación y fusión, y evaluar la representatividad espacial de cada estación. Esta información resulta particularmente valiosa en períodos de transición, cuando la cobertura nival puede ser discontinua.

4.7.4 Temperatura de suelo como indicador de cobertura nival

La temperatura del suelo medida en las estaciones nivometeorológicas constituye un indicador indirecto, pero altamente informativo, del estado de cobertura nival. Cuando el suelo se encuentra cubierto por nieve, la capa nival actúa como aislante térmico, reduciendo la amplitud térmica diaria y manteniendo valores de temperatura relativamente estables.

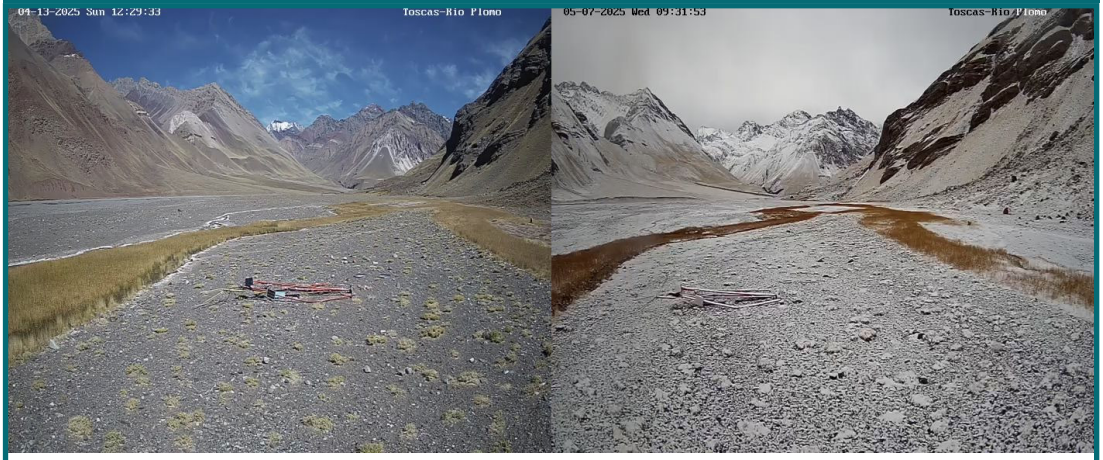
En contraste, cuando el suelo está descubierto, la temperatura presenta mayores oscilaciones entre valores máximos y mínimos diarios, reflejando la influencia directa de la radiación solar y del enfriamiento nocturno. El análisis conjunto de la temperatura del suelo y de los registros de EAN permite, por lo tanto, aumentar la certidumbre sobre la presencia efectiva de nieve en el entorno del sensor.

4.7.5 Observación directa mediante cámaras de video

La incorporación de cámaras de video en estaciones de alta montaña ha añadido una dimensión cualitativa clave al proceso de validación. Estas cámaras permiten observar en tiempo real las condiciones del manto nival y de la atmósfera, registrando el inicio, la duración y la intensidad de las nevadas, así como los procesos de redistribución por viento.

La información visual como se observa en el Cuadro 4.7, resulta particularmente útil para interpretar situaciones en las que los sensores automáticos muestran comportamientos atípicos, como incrementos o descensos abruptos del EAN. Asimismo, las cámaras facilitan la evaluación de la calidad de la nieve, la formación de costras y la evolución superficial del manto (Cuadro 4.8).

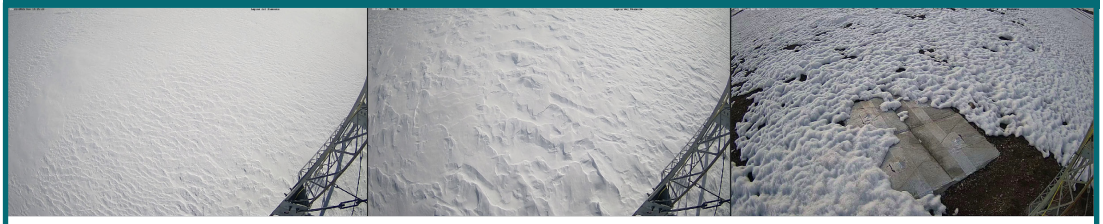
Cuadro 4.8 **Río Plomo – Estación Toscas. Secuencia estacional registrada por cámaras del SIH.**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Nota: imágenes captadas por las cámaras automáticas del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) en la estación Toscas, cuenca del Río Plomo. La comparación ilustra el contraste entre condiciones de estiaje (sin cobertura nival) y condiciones invernales con acumulación de nieve en la cuenca alta. Este registro visual complementa las mediciones instrumentales y permite documentar la evolución temporal del manto nival y su relación con el régimen de escurrimiento. La evolución visual de la cobertura nival constituye un insumo cualitativo complementario a las mediciones de EAN y caudal, aportando contexto espacial al análisis del Pronóstico de Escurrimientos.

Cuadro 4.9 **Secuencia de fotos captadas por cámaras del SIH en la estación Laguna del Diamante**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

Nota: esta secuencia de imágenes ilustra los distintos estados del manto nival capturados con las cámaras instaladas en la estación Nivométrica Laguna del Diamante: en la imagen de la izquierda se observa la superficie cubierta tras una nevada reciente; en la imagen del centro la redistribución de la nieve por acción del viento, con formación de estructuras superficiales y zonas erosionadas; y en la imagen de la derecha el proceso de fusión, con pérdida de continuidad del manto. Estas observaciones visuales complementan la información instrumental y facilitan la interpretación de la variabilidad espacial y temporal del Equivalente de Agua en Nieve (EAN) en ambientes de alta montaña.

4.7.6 Integración de fuentes y criterios operativos

La validación multifuente en el SIH no se limita a la comparación puntual de datos, sino que se basa en la **integración coherente** de información proveniente de sensores automáticos, mediciones manuales, imágenes satelitales y observación directa. Este enfoque permite identificar inconsistencias, comprender su origen y definir criterios operativos para el uso de los datos.

Desde una perspectiva hidrológica, la consistencia entre métodos es más relevante que la coincidencia exacta, ya que la variabilidad espacial y temporal del manto nival impone límites inherentes a la precisión de cualquier medición puntual. La validación multifuente se constituye así en un elemento central para la confiabilidad del sistema y para la toma de decisiones en tiempo real.

4.8 OPERACIÓN, QA/QC Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA

4.8.1 Enfoque operativo del SIH

El Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) fue concebido desde su origen como una herramienta de **hidrología operativa**, lo que implica que la medición, transmisión y publicación de datos deben realizarse con continuidad, confiabilidad y en plazos compatibles con la toma de decisiones. En este contexto, la operación del sistema no se limita al funcionamiento de los sensores, sino que abarca un conjunto de procedimientos destinados a garantizar la calidad y trazabilidad de la información.

La operación del SIH integra actividades de mantenimiento en campo, monitoreo remoto de estaciones, validación de datos y generación de productos operativos, conformando un ciclo continuo que se repite a lo largo de cada temporada nival.

4.8.2 Operación y mantenimiento de estaciones

Las estaciones nivometeorológicas del SIH se emplazan en ambientes de alta montaña, caracterizados por condiciones extremas de viento, temperatura y accesibilidad limitada. En este contexto, la operación del sistema se apoya en campañas de mantenimiento programadas, generalmente concentradas en el período estival, cuando las condiciones de acceso y seguridad son más favorables.

Las tareas de mantenimiento incluyen, entre otras:

- inspección estructural de la estación y de sus anclajes,
- verificación y limpieza de sensores,
- control del estado de snow pillows, balanzas y sensores de altura,
- revisión de sistemas de energía (paneles solares y baterías),
- verificación de enlaces de comunicación y transmisión de datos.

Durante la temporada invernal, el seguimiento operativo se realiza principalmente de manera remota, mediante el monitoreo continuo de los registros y del estado de las estaciones.

4.8.3 Control de calidad de datos (QA/QC)

El control de calidad de los datos constituye un componente central de la operación del SIH. Dado que las mediciones se utilizan con fines operativos, el sistema incorpora procedimientos de **QA/QC** orientados a identificar errores instrumentales, inconsistencias físicas y anomalías temporales.

Entre los criterios aplicados se incluyen:

- verificación de rangos esperables para cada variable,
- análisis de coherencia temporal (saltos abruptos no explicables),
- comparación cruzada entre variables relacionadas (por ejemplo, EAN y temperatura de suelo),
- contraste con información independiente proveniente de cateos, imágenes satelitales y cámaras de video.

Es importante destacar que, en un sistema operativo, el QA/QC no busca eliminar toda incertidumbre, sino **caracterizarla y gestionarla**, permitiendo el uso informado de los datos.

4.8.4 Incertidumbre y criterios de uso operativo

La medición del manto nival está sujeta a incertidumbres inherentes tanto a la instrumentación como a la variabilidad espacial del sistema. En el caso de los snow pillows utilizados en el SIH, la experiencia operativa indica una incertidumbre típica del orden de **±10 mm de EAN**, valor considerado aceptable para aplicaciones hidrológicas.

Este criterio no se interpreta como un error puntual, sino como un rango de confianza dentro del cual los datos pueden utilizarse para el análisis de tendencias, la comparación interanual y el pronóstico de escurrimientos. La explicitación de la incertidumbre forma parte del enfoque técnico del SIH y constituye una condición necesaria para una gestión responsable de la información.

4.8.5 Modernización del sistema

A lo largo de su evolución, el SIH ha experimentado un proceso continuo de modernización tecnológica, orientado a mejorar la disponibilidad, resolución y confiabilidad de los datos. Este proceso incluyó la incorporación progresiva de nuevas tecnologías de transmisión, mejoras en los sistemas de energía y la ampliación de las capacidades de observación.

En etapas recientes, la migración hacia enlaces satelitales de alta capacidad permitió reducir significativamente la latencia entre la medición en campo y la disponibilidad de los datos, habilitando la transmisión en tiempo casi real y la integración de cámaras de video en estaciones seleccionadas. Estas mejoras fortalecieron el carácter operativo del sistema y ampliaron las posibilidades de validación y análisis.

4.8.6 Publicación de información y rol institucional

Un aspecto distintivo del SIH es la publicación sistemática de información, a través de productos operativos como el Boletín Información Hidronivometeorológico. Este boletín resume diariamente la situación hidrológica de la provincia, integrando datos de nieve, meteorología, caudales y embalses.

A diferencia de otros sistemas de observación que operan con datos desplazados en el tiempo, el SIH prioriza la disponibilidad temprana de la información, aun reconociendo su carácter preliminar y sujeto a revisión posterior. Este enfoque posiciona al Departamento General de Irrigación no solo como operador de una red de medición, sino como gestor y comunicador de información hidrológica, con impacto directo en la toma de decisiones.

La publicación temprana de información implica necesariamente el carácter preliminar de los datos, los cuales son posteriormente revisados y consolidados.

Este enfoque prioriza la utilidad operativa sin comprometer la trazabilidad ni la calidad final de la información.

4.8.7 Síntesis operativa

La combinación de procedimientos de operación, control de calidad y modernización tecnológica ha permitido consolidar al SIH como un sistema robusto y confiable para la observación nival en alta montaña. La experiencia acumulada demuestra que la calidad de la información no depende exclusivamente de la instrumentación, sino de la integración coherente de tecnología, procedimientos y criterio técnico.

Este enfoque operativo sienta las bases para la interpretación de la información nival y para la comprensión de la dinámica de las nevadas en la cordillera de Mendoza, aspectos que se desarrollan en los capítulos siguientes.

4.9 DISCUSIÓN

4.9.1 De la medición puntual a la comprensión del sistema nival

La experiencia acumulada a partir de la implementación y operación del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) pone de manifiesto una diferencia fundamental entre **medir nieve y comprender la dinámica del manto nival**. Mientras que las mediciones puntuales o aisladas permiten obtener valores individuales de altura o contenido de agua, la integración sistemática de múltiples métodos y escalas temporales ha permitido avanzar hacia una interpretación más completa de los procesos nivales en la cordillera de Mendoza.

En la práctica operativa, el valor principal del SIH no reside únicamente en la cantidad de datos generados, sino en la **coherencia y continuidad temporal** de las observaciones, que hacen posible analizar tendencias, identificar patrones recurrentes y distinguir comportamientos estructurales del sistema frente a la variabilidad interanual.

4.9.2 Heterogeneidad espacial de las nevadas en la cordillera de Mendoza

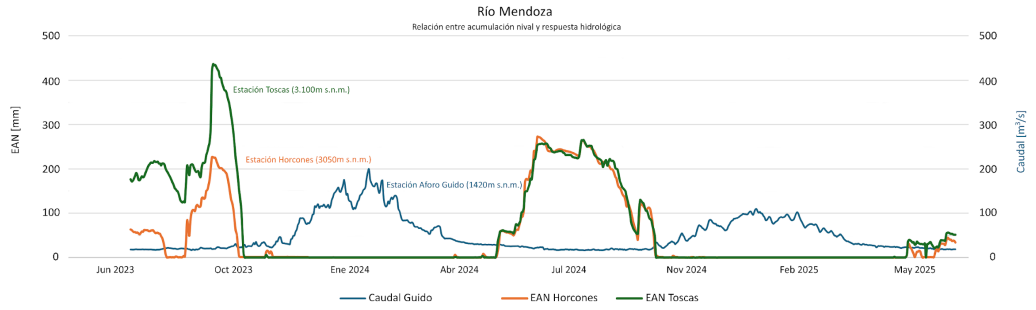
Uno de los principales resultados derivados de la operación sostenida del SIH es la confirmación de que la nieve en la cordillera de Mendoza **no se distribuye de manera homogénea en el espacio**. Las diferencias observadas entre cuencas, valles e incluso entre estaciones cercanas ponen en evidencia una marcada variabilidad espacial, tanto en términos de cantidad de nieve acumulada como de su estructura y persistencia.

Esta heterogeneidad responde a una combinación de factores, entre los que se destacan la topografía, la altitud, la orientación de laderas y, de manera particularmente relevante, la acción del viento. Los procesos de transporte eólico generan redistribuciones significativas del manto nival, produciendo zonas de acumulación preferencial y áreas erosionadas, que no siempre coinciden con criterios geomorfológicos simples.

La validación multifuente, apoyada en imágenes satelitales y observación directa mediante cámaras de video, ha sido clave para interpretar estas diferencias y evitar extrapolaciones indebidas a partir de mediciones puntuales.

El caudal corresponde a la sección de aforo Guido (Cuadro 4.10). El EAN se mide en estaciones de alta montaña del SIH.

Cuadro 4.10 **Relación entre el Equivalente de Agua en Nieve (EAN) medido en las estaciones Toscas y Horcones y el caudal registrado en la Estación Guido**



Fuente: Departamento General de Irrigación

Nota: las estaciones Toscas y Horcones están ubicadas en la cuenca alta del río Mendoza, y el caudal registrado en la sección de aforo Guido durante las temporadas 2023–2024–2025. El gráfico muestra la marcada heterogeneidad espacial de la acumulación nival entre estaciones cercanas y el desacople temporal entre la acumulación invernal y la respuesta hidrológica, que se manifiesta meses después durante el período de fusión. El comportamiento observado ilustra el uso del EAN como indicador anticipado de la respuesta hidrológica, sin que exista correspondencia directa ni inmediata entre nevadas individuales y caudales.

4.9.3 Variabilidad temporal y dinámica del manto nival

Además de su heterogeneidad espacial, el manto nival presenta una **dinámica temporal compleja**, caracterizada por episodios sucesivos de acumulación, compactación, fusión parcial y rehielo. Los registros continuos de EAN obtenidos mediante snow pillows

y balanzas de nieve evidencian que la evolución del manto no es un proceso lineal, aun durante períodos sin nuevas precipitaciones.

Los procesos de metamorfismo seco y de fusión–recongelación modifican progresivamente la estructura interna del manto, afectando su densidad, permeabilidad y capacidad de retención de agua. Estas transformaciones explican variaciones en la señal de los sensores automáticos que no necesariamente corresponden a cambios en la cantidad total de nieve, sino a reorganizaciones internas del manto.

La interpretación de esta dinámica requiere necesariamente de información complementaria, como la temperatura del suelo, la estratigrafía observada en calicatas y la evidencia visual provista por cámaras de video.

La respuesta del manto nival no es lineal respecto de las condiciones meteorológicas, lo que refuerza la necesidad de registros continuos y de observación integrada para su correcta interpretación.

Este comportamiento ha sido observado de manera consistente a lo largo de distintas temporadas, incluso en años hidrológicos contrastantes.

4.9.4 Cantidad versus calidad de la nieve

Un aporte conceptual relevante del enfoque adoptado por el SIH es la distinción entre **cantidad de nieve** y **calidad del manto nival.** Dos sitios con valores similares de EAN pueden presentar comportamientos hidrológicos diferentes en función de la estructura interna del manto, su densidad, la presencia de capas impermeables o de costras de rehielo, y el contenido de agua líquida.

Esta diferenciación resulta particularmente importante para la interpretación del inicio y la tasa de fusión, así como para la generación de escurrimientos. La información cualitativa obtenida a partir de calicatas y observación directa complementa de manera indispensable las mediciones cuantitativas, permitiendo una lectura más fina del sistema.

4.9.5 Implicancias para la hidrología operativa

Desde el punto de vista de la hidrología operativa, los resultados del SIH refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque **integrado y cauteloso** en la utilización de la información nival. La heterogeneidad espacial y la dinámica temporal del manto imponen límites claros a la extrapolación directa de datos puntuales y subrayan la importancia de la validación cruzada y del análisis contextual.

La disponibilidad de datos en tiempo casi real, combinada con criterios explícitos de incertidumbre, permite mejorar la toma de decisiones, aun en un contexto de información

imperfecta. En este marco, la gestión operativa del recurso hídrico se beneficia más de la **consistencia y oportunidad** de los datos que de una precisión aparente basada en mediciones aisladas.

4.9.6 Aportes del SIH al conocimiento nivológico regional

La operación continua del SIH durante más de dos décadas ha permitido construir una base de conocimiento empírico única sobre el comportamiento de la nieve en la cordillera de Mendoza. Este conocimiento no surge únicamente de la instrumentación utilizada, sino del aprendizaje acumulado a partir de la interacción entre datos, observación directa y criterio técnico.

El SIH ha demostrado que la comprensión del sistema nival requiere observarlo como un proceso dinámico, influenciado por múltiples factores y escalas, y no como un fenómeno estático susceptible de ser descrito mediante un único indicador. Esta perspectiva constituye uno de los principales aportes del sistema al conocimiento nivológico regional y sienta bases sólidas para el desarrollo de estrategias de gestión adaptativas frente a escenarios de creciente variabilidad climática.

4.10 CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada a partir de la implementación y operación del Sistema de Información Hidronivometeorológico (SIH) del Departamento General de Irrigación permite extraer una serie de conclusiones relevantes desde el punto de vista técnico, operativo y conceptual.

En primer lugar, la medición del manto nival en regiones de alta montaña no puede abordarse de manera adecuada mediante un único método ni a partir de observaciones aisladas. La nieve constituye un sistema altamente variable en el espacio y en el tiempo, cuya caracterización requiere la integración de mediciones puntuales, registros continuos y herramientas de validación independientes.

La adopción del **Equivalente de Agua en Nieve (EAN)** como variable central ha demostrado ser conceptualmente correcta y operativamente eficaz, al vincular de manera directa la medición nival con el aporte hídrico potencial durante la temporada de fusión. Sin embargo, la experiencia acumulada confirma que la interpretación del EAN debe realizarse siempre en un contexto más amplio, considerando la estructura y la evolución del manto nival.

Uno de los principales aportes del SIH, a partir de más de casi tres décadas de operación y aprendizaje acumulado, ha sido la comprensión de la heterogeneidad nival en la cordillera de Mendoza. El análisis sistemático de datos y su validación multifuente revela

que la nieve no se distribuye de manera homogénea, evidencia contrastes espaciales y temporales significativos. Diferencias significativas entre cuencas, valles y sitios cercanos responden a la interacción entre topografía, altitud, orientación y, de manera determinante, a los procesos de transporte y redistribución por viento.

La distinción entre **cantidad de nieve y calidad del manto nival** emerge como un aspecto clave para la interpretación hidrológica. Valores similares de EAN pueden corresponder a mantos con comportamientos hidrológicos diferentes, dependiendo de su densidad, estratigrafía, contenido de agua líquida y grado de metamorfismo. En este sentido, las calicatas, la observación directa y el análisis térmico complementan de manera indispensable a las mediciones automáticas.

Desde una perspectiva operativa, la integración de métodos manuales, sensores automáticos, imágenes satelitales y cámaras de video ha permitido construir un **sistema robusto de validación a partir de múltiples fuentes**, orientado no a eliminar la incertidumbre, sino a gestionarla de manera explícita. La definición de criterios de uso operativo y rangos de confianza ha resultado fundamental para la toma de decisiones en tiempo real.

La modernización progresiva del SIH, particularmente en lo referido a la transmisión de datos y a la incorporación de nuevas capacidades de observación, ha consolidado un enfoque de **hidrología operativa en tiempo casi real**, diferenciando al sistema de otros esquemas de observación que operan con datos desplazados en el tiempo. La publicación diaria de información hidronivometeorológica constituye un hito en la historia de la gestión hídrica provincial y un aporte significativo al ámbito hidrológico nacional.

La experiencia del SIH demuestra que la medición de la nieve, cuando se aborda como un sistema integrado y sostenido en el tiempo, permite trascender la simple cuantificación del recurso y avanzar hacia una **comprensión profunda de la dinámica nival**, condición indispensable para una gestión del agua más eficiente, adaptativa y resiliente frente a la variabilidad climática.

La experiencia del SIH constituye un antecedente relevante en el contexto argentino y andino, demostrando que la medición nival sostenida, integrada y orientada a la operación permite avanzar hacia una gestión del agua más informada y resiliente.

4.11 BIBLIOGRAFÍA

4.11.1 Referencias institucionales y nacionales

Abeyá, J. E. (2008). *Metodología utilizada por el Departamento General de Irrigación en la medición de la nieve*. Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina.

Departamento General de Irrigación. (2008, abril 30). *Informe de ensayo de snow pillows*. Documento técnico interno, Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina.

Departamento General de Irrigación. (s. f.). *Planos y protocolos del Sistema de Información Hidro-nivometeorológico (SIH): ET-1177 (torre ~4,6 m), Detalle estación nivométrica 4,5 m y 6 m, Detalle snow pillow, tubo colector, conexión de sensor y medidas de cañerías*. Documento técnico interno, Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina.

Lascano, M. E. (2007). *Dónde y cómo se mide la nieve en los Andes*. Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina.

Madíl, F. R., & Vallejos, R. M. (s. f.). *Pronósticos de caudales sobre la base de mediciones directas de nieve*. Agua y Energía Eléctrica, Argentina.

Organización Meteorológica Mundial. (2020). *Los instrumentos y la medición de la precipitación en superficie*. Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Organización Meteorológica Mundial. (2023). *Guide to instruments and methods of observation* (WMO-No. 8, Vols. I–V). Organización Meteorológica Mundial.

Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). *Cronología institucional*. Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina.

Villarreal, R. (2019). *La medición del recurso hídrico en la provincia de Mendoza*. Monografía. Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina.

4.12 Referencias específicas sobre snow pillows

4.12.1 Artículos científicos y documentos técnicos internacionales

Beaumont, R. T. (1965). Mt. Hood pressure pillow snow gage. *Journal of Applied Meteorology*, 4(5), 626–631. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1965)004<0626:MHPPSG>2.0.CO;2

Natural Resources Conservation Service. (2023). SNOTEL, the Soil Climate Analysis Network, and water supply forecasting. *Journal of the American Water Resources Association*, 59, 585–599. https://doi.org/10.1111/1752-1688.13154 Province of British Columbia. (s. f.). *Automated snow weather stations / Snow conditions and water supply bulletin*. Government of British Columbia.

Avalanche Association of Canada. (s. f.). *A snapshot of British Columbia's snow survey program*. Avalanche Association of Canada.

Stranden, H., & Saloranta, T. (2021). *NVE's snow reference datasets for climate change studies* (actualizado diciembre 2021). Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). https://www.nve.no

4.12.2 Estudios y datasets europeos (snow pillow como referencia)

Austrian Federal Service for Avalanche Warning. (s. f.). *Snow water equivalent measurements at Kühtai using snow pillows (1990–2015)*.

Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF). (s. f.). *Validation of snow pillow measurements at Weissfluhjoch (2015–2018)*. Copernicus Publications.

Italian Avalanche Association (AINEVA). (s. f.). *Snow pillow measurements at alpine stations during the 2008/09–2009/10 seasons*. AINEVA.

4.12.3 América del Sur

Lascano, M. E. (2007). *Dónde y cómo se mide la nieve en los Andes*. Departamento General de Irrigación, Mendoza, Argentina. Correa Céspedes, H. E. (2013). *Análisis de rutas de nieve y pronóstico de caudales en Chile Central* [Tesis de grado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.

Soto, A., et al. (2010). *Aplicación de mediciones de nieve en la cuenca del río Aconcagua*. Dirección General de Aguas (DGA), Chile.

5 GESTIÓN DE PROYECTOS Y EL DISEÑO HIDROLÓGICO

Ing. Esp. Rubén Villodas[6] - Ing. Carlos Martini[7]

5.1 RESUMEN

En la ingeniería civil contemporánea, el diseño hidrológico ha trascendido su carácter meramente instrumental para consolidarse como el eslabón crítico que traduce la variabilidad climática y territorial en solicitaciones cuantificables para la infraestructura.

Este capítulo aborda la hidrología como una herramienta estratégica de gestión, donde el diseño no se reduce a una sumatoria de cálculos, sino que constituye una argumentación técnica que vincula la amenaza climática con la vulnerabilidad, las consecuencias y los niveles de riesgo aceptables para la sociedad. Bajo esta premisa, el estudio hidrológico se integra con la lógica de gestión de proyectos, alineándose con metodologías para la identificación, evaluación y tratamiento de riesgos.

La metodología propuesta estructura el diseño en tres escenarios operativos condicionados por la disponibilidad de información: el análisis de frecuencia para series robustas, la transferencia regional para registros limitados y la modelación lluvia-escorrentía para cuencas sin aforos.

En contextos de escasez de datos, se enfatiza el uso de modelos con base física, como la

6 Ingeniero Civil, Especialista en Ingeniería Ambiental, Director de Gestión Hídrica del Departamento General de Irrigación, Profesor Titular de Hidrología e Hidrología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo y Jefe Componente Defensa Aluvional – Proyecto Integral Reducción Los Andes.

7 Ingeniero Civil, Director de Ingeniería del Departamento General de Irrigación y Jefe Componente de Riego – Proyecto Integral Reducción Los Andes.

Onda Cinemática, y métodos conceptuales como el Número de Curva (CN), asegurando que los parámetros adoptados reflejen fielmente la respuesta geomorfológica del territorio. Un aporte esencial del texto es la distinción entre el Tiempo de Recurrencia (TR) y la Probabilidad Anual de Excedencia (AEP), subrayando que el riesgo real debe evaluarse sobre la vida útil de la obra para comunicar de forma intuitiva la probabilidad de falla acumulada.

Ante los desafíos de la no estacionariedad climática, se introduce al diseño adaptativo como una estrategia para gestionar la incertidumbre mediante soluciones modulares y planes de monitoreo. El capítulo concluye validando estos conceptos a través del Proyecto Integral Reducción Los Andes, donde la caracterización morfométrica de precisión y la optimización espacial de la Tormenta de Proyecto Mendoza permitieron transformar un sistema de riego en una infraestructura dual de defensa aluvional, demostrando que una hidrología rigurosa es el pilar fundamental de la resiliencia y la gobernanza hídrica.

5.2 HIDROLOGÍA APLICADA Y DECISIÓN DE PROYECTO

En la ingeniería civil contemporánea, el diseño hidrológico dejó de ser una instancia meramente instrumental para convertirse en el eslabón que transforma la variabilidad climática y territorial en solicitaciones cuantificables sobre la infraestructura. Puentes, alcantarillas, defensas aluvionales, canales, obras de drenaje urbano, presas y derivaciones operan dentro de un rango de amenazas hidrológicas que no se describe adecuadamente con un único valor fijo y predecible.

En la práctica, al iniciarse la formulación de un proyecto, la pregunta de diseño siempre es doble:

- √ qué magnitud hidrológica se adopta;
- √ qué nivel de incertidumbre se acepta al adoptarla.

Cuando esta doble pregunta se responde o resuelve, el estudio deja de ser una sumatoria de cálculos y pasa a ser una argumentación técnica que une amenaza, vulnerabilidad, consecuencias y criterios de desempeño.

El objetivo técnico del diseño hidrológico puede expresarse como una traducción de "trazabilidad". Por un lado, se estima el insumo hidrológico del proyecto (caudales máximos, volúmenes escurridos, hidrogramas, niveles o tirantes de agua, duraciones, combinaciones coincidentes, etc.) con un marco probabilístico explícito.

Por otro lado, se vincula ese insumo con estándares de servicio y con niveles de riesgo aceptables para el comitente y la sociedad, de modo que la decisión sea defendible en términos hidráulicos, económicos, sociales y regulatorios. Esta mirada es especialmente importante en la gestión hídrica porque las obras suelen ser parte de sistemas y políticas:

una alcantarilla mal dimensionada puede inducir anegamientos recurrentes que degradan la movilidad urbana; una defensa aluvional puede transferir riesgo aguas abajo; una presa puede reducir picos frecuentes, pero aumentar la exposición si se habilita urbanización en zonas antes inundables.

Por ello, el estudio debe comenzar por definir el problema de gestión y de ingeniería antes de elegir métodos. Tipo de obra, vida útil y criticidad del servicio, condiciones de operación, consecuencias de falla, exposición de población, costos de interrupción, compatibilidad con normativa y con instrumentos territoriales son insumos que determinan qué variable hidrológica es relevante.

Por ejemplo, en un sistema de desagüe urbano puede importar el pico que se produce en pocos minutos u horas; en una presa de atenuación de crecidas aluvionales puede importar el volumen y la combinación de aportes; en un puente importa el pico y la forma del hidrograma por su relación con niveles y socavación en pilas y estribos; en una defensa puede importar un conjunto de escenarios porque el sobrepaso y la erosión dependen de la duración además del pico.

Desde esta base, la hidrología aplicada se integra naturalmente con la lógica general de proyectos: definir objetivos, establecer criterios de aceptación, analizar alternativas, justificar decisiones y documentar riesgos residuales o de rotura.

La caracterización de cuenca y clima es la base que sostiene esa integración de actividades. Al evaluar una cuenca se articulan morfometría, conectividad del sistema de desagüe o cauces, pendientes y almacenamiento, litología y suelos, cobertura y uso del suelo, regulación o actividad antrópica, grado de urbanización, y presencia de procesos nivales/glaciares o de sedimentos.

Entre las consideraciones climáticas se articulan el régimen de precipitaciones, estacionalidad, dominancia de tormentas convectivas u orográficas, duración típica de tormentas, variabilidad interanual y existencia de eventos compuestos, como lluvia intensa sobre suelos saturados o lluvia sobre nieve.

Esta lectura no reemplaza la estadística, pero evita que la estadística disfrace o no sea lo suficientemente clara por falta de contexto: distribuciones y parámetros no son propiedades abstractas, sino resúmenes numéricos de procesos físicos.

5.3 ESCENARIOS DEL DISEÑO HIDROLÓGICO

Una forma robusta de estructurar el diseño hidrológico, y en general de cualquier diseño basado en fenómenos naturales, es distinguir escenarios, según la evidencia o información disponible. No se trata solo de si hay datos o no, sino de cuánto conocimiento confiable se puede extraer de ellos: longitud de serie, control de calidad, continuidad, representatividad espacial, consistencia instrumental y estabilidad del régimen hidrológico.

En términos operativos pueden considerarse tres situaciones típicas:

- un escenario con serie robusta que permite análisis directo de extremos en el sitio;
- un escenario con serie limitada o incompleta que exige aumentar información efectiva mediante transferencia regional y técnicas estadísticas más robustas;
- un escenario sin aforos sistemáticos en el que el diseño se apoya en la lluvia de diseño y en modelos lluvia/escorrentía, reforzados por controles indirectos.

En los tres escenarios, la exigencia metodológica es la misma: explicitar supuestos, cuantificar incertidumbres y demostrar consistencia física. Antes de cualquier análisis probabilístico debe verificarse que el registro sea razonablemente homogéneo e independiente a la escala de interés.

La homogeneidad se altera por cambios de estación, modificaciones del sensor, cambios en la sección de aforo, obras aguas arriba o urbanización acelerada; la independencia anual se altera cuando se eligen mal los eventos o cuando la serie se contamina con datos de la misma tormenta en distintos años hidrológicos. Una serie extensa pero no homogénea puede producir extrapolaciones aparentemente precisas y, sin embargo, conceptualmente inválidas, lo que en gestión se traduce en una falsa sensación de seguridad.

Estos conceptos dan permiten introducir un paralelo metodológico entre gestión hídrica, diseño hidrológico y gestión de riesgos. Las tres disciplinas comparten una misma arquitectura de decisión: se define un objetivo y un criterio, se diagnostica el sistema, se identifican amenazas y vulnerabilidades, se modela el comportamiento bajo escenarios, se eligen medidas de tratamiento y se implementa monitoreo con mejora continua.

La norma ISO 31000[8] formaliza este enfoque para la gestión del riesgo, destacando la necesidad de definir contexto y criterios, evaluar riesgos y tratarlos mediante opciones que se revisan y mejoran con el tiempo.

En el diseño hidrológico, la definición del criterio (por ejemplo, probabilidad anual de excedencia o de que el criterio de diseño sea superado, o la probabilidad de falla de la obra durante su vida útil, o el criterio de continuidad del servicio que presta un proyecto) cumple el rol de "criterio de riesgo", y las alternativas de proyecto son soluciones o medios para mitigar ese riesgo, las que pueden ser estructurales y no estructurales.

La consecuencia práctica de este paralelo es que un estudio hidrológico bien formulado

8 La norma ISO 31000 (2018) es un estándar internacional que proporciona principios, un marco de trabajo y un proceso para gestionar riesgos en cualquier organización. Sirve para identificar, analizar, evaluar, tratar y supervisar riesgos sistemáticamente, protegiendo activos, mejorando la toma de decisiones y creando valor.

no termina en un número, sino en una decisión gestionable. La formulación completa del proyecto técnica debe incluir, no solo el caudal o hidrograma de proyecto, sino también una descripción clara de qué significa ese número, qué tan sensible es a supuestos claves, cómo se comporta el sistema ante sobrepaso, y qué plan de monitoreo permite revisar el diseño si se detecta un cambio del régimen hidrológico o meteorológico. Esta lógica convierte al diseño en un componente de la gobernanza del agua: alinea la ingeniería con la operación y con la planificación territorial.

5.3.1 Escenario I: series robustas y análisis de frecuencia de crecidas

Cuando se dispone de un registro histórico suficientemente extenso y de buena calidad de caudales máximos anuales, o de picos por evento, el diseño suele apoyarse en análisis de frecuencia.

La idea es inferir o ajustar una distribución de probabilidad teórica "$F_{T(x)}$" para una variable extrema (la infinita población de posibles caudales máximos anuales) a partir de una muestra finita (serie de caudales máximos anuales relevados en la serie histórica) y, con esa inferencia, estimar magnitudes de diseño, asociadas a probabilidades anuales de excedencia.

El proceso comienza con la construcción de la serie de valores extremos (como los caudales máximos anuales), su ordenamiento y la asignación de probabilidades empíricas mediante fórmulas de posicionamiento. Una de las más usadas es la de Weibull, que aproxima la no excedencia como:

$$F_{(x)} = \frac{n}{N+1}$$

Donde:

$F_{(x)}$ función de distribución de probabilidades empírica de los datos;

n es el orden del dato, cuando se ordena la serie en forma creciente;

N el tamaño muestral total o total de datos de la serie.

A partir de esa base, se ajustan distribuciones teóricas "$F_{T(x)}$", como Gumbel, Log-Normal, Generalizada de Valores Extremos (GVE), Pearson Tipo III o su variante Log-Pearson III, estimando los parámetros de cada una de estas distribuciones por métodos consistentes como máxima verosimilitud, momentos o L-momentos.

La elección de función de distribución de probabilidades teórica no es un detalle matemático, ya que afecta en cuánto "pesa" cada dato, por un lado, cómo se representa la cola superior, por otro, y finalmente qué estabilidad tiene la extrapolación a valores de diseño

superiores, que es probable que no se hayan relevado o medido en la serie histórica base.

La selección de la distribución no debería reducirse a tradición o comodidad. Debe apoyarse en evidencia gráfica, pruebas de bondad de ajuste y, sobre todo, en una lectura crítica de la cola superior, porque allí se define el diseño de obras críticas.

Pruebas como Kolmogorov-Smirnov controlan discrepancias globales entre distribución empírica y teórica, mientras que Anderson-Darling suele ser más sensible en colas, que es donde el error cuesta caro.

En paralelo, es recomendable acompañar el valor de diseño con intervalos de confianza y análisis de sensibilidad. Este paso transforma la estadística en herramienta de gestión: permite comunicar que el caudal estimado no es un punto fijo, sino un rango probable, y que el proyecto toma posición dentro de ese rango según consecuencias y costos.

En el ámbito profesional moderno, el tratamiento de información no sistemática es parte importante del trabajo, no un accesorio. Marcas de crecida, fotografías, notas periodísticas verificables, registros de daños, paleocrecidas o evidencia botánica pueden restringir la admisibilidad de extrapolaciones cuando el período relevado, o serie histórica de datos, es corto respecto de los valores de diseño que deben considerarse para el diseño de la obra.

5.3.1.1 Tiempo de Recurrencia (TR)

El diseño de una obra hidráulica se basa en la probabilidad de ocurrencia de un evento adoptado como referencia para ese diseño, ya que los registros y mediciones históricas son finitos y la naturaleza es aleatoria.

Por eso se utilizan diversos parámetros estadísticos, entre los cuales destacan el "Tiempo de Recurrencia (TR)" y la "Probabilidad Anual de Excedencia (AEP)".

El diseño clásico de obras se basa en la adopción previa de un tiempo de recurrencia TR, o periodo de retorno, el cual se define como: el promedio en años, en el que un evento natural extremo (inundación, sismo, etc.), de una intensidad determinada, es igualado o superado.

Por ejemplo, si se está formulando el proyecto de un puente carretero, se debe adoptar un evento para el diseño o el "caudal de diseño". La adopción de ese caudal de diseño se hace a través de la elección de un tiempo de recurrencia (TR), que puede ser de 50 años. Esto implica que, en promedio, cada 50 años, ese caudal de diseño va a ser igualado o superado.

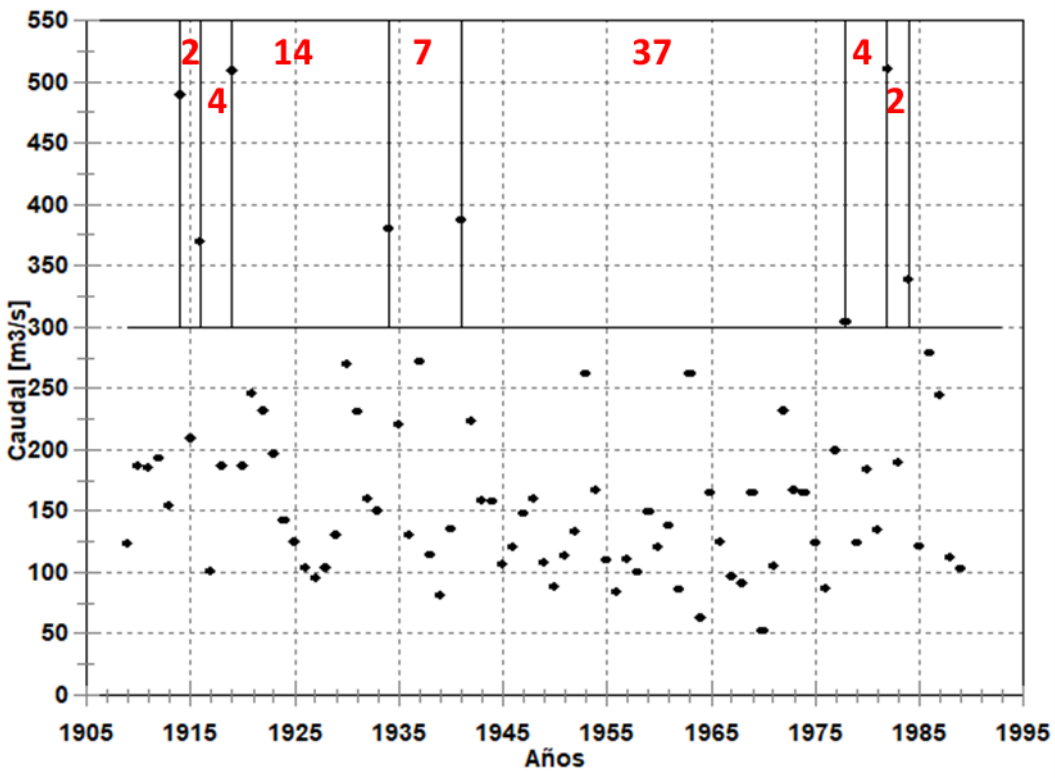
Por lo tanto, este TR es un concepto estadístico y de probabilidad utilizado en ingeniería para diseñar estructuras, no predice cuándo ocurrirá el evento, ya que por ser un "promedio", dos caudales iguales o superiores al de diseño pueden ocurrir en dos años seguidos o en un período de varios años, mayor al TR adoptado. Es un promedio, no un "calendario"

que indica cuándo se tiene que cumplir el evento de diseño.

Es importante que se comprenda este concepto, que se grafica en el Cuadro 5.1, en el que:

- √ se han graficado los caudales máximos anuales, para una serie que va desde el año 1911 a 1989;
- √ se adopta un valor de referencia igual a 300 m³/s;
- √ se identifican los "intervalos de recurrencia" entre años en los que hay caudales iguales a mayores a 300 m³/s (2 años, 4 años, 14 años, 7 años, 37 años, etc.);
- √ se promedian estos intervalos de recurrencia (10 años);
- √ se define que el tiempo de recurrencia de 300 m³/s es de 10 años.

Cuadro 5.1 **Tiempo de Recurrencia - Esquema conceptual**



Fuente: Banco de imágenes Departamento General de Irrigación

$$TR_{300\ m^3/s} = \frac{2+4+14+7+37+4+2}{7} = 10\ años$$

Cabe aclarar que este cálculo es sólo a efectos de que se comprenda el concepto de TR,

ya que en la práctica profesional, el proceso es inverso: se elige inicialmente un tiempo de recurrencia y luego se calcula el caudal de referencia, o de diseño, que lo cumple, utilizando para esto los ajustes de funciones de probabilidad antes mencionadas.

Este concepto de tiempo de recurrencia es bien manejado en el ambiente profesional del diseño de obras, pero para que el diseño hidrológico sea útil en la gestión, conviene referirse a otro concepto íntimamente ligado a la recurrencia y más intuitivo en general, que es la "probabilidad anual de excedencia", AEP por su significado en inglés.

Si se habla de un evento tiene un tiempo de recurrencia de 100 años, se puede decir que cada año tiene el 1 % de probabilidad de ser igualado o superado. Esta forma de expresar la misma "estadística", evita la interpretación errónea de periodicidad del tiempo de recurrencia.

En la formulación clásica bajo conceptos de estacionariedad, el tiempo de retorno "TR", función de distribución de probabilidad acumulada "$F_{(x)}$" y la probabilidad anual de excedencia "$AEP_{(x)}$" se relacionan:

$$F_{(x)} = P_{(X<x)}$$

$$AEP_{(x)} = P_{(X\geq x)} = 1 - P_{(X<x)} = 1 - F_{(x)}$$

$$AEP_{(x)} = \frac{1}{TR}$$

$$TR = \frac{1}{AEP_{(x)}} = \frac{1}{1 - F_{(x)}}$$

Conviene insistir en el significado gerencial: TR no implica periodicidad; expresa una frecuencia media a largo plazo, y por eso puede ocurrir más de una excedencia en pocos años o ninguna durante décadas.

5.3.1.2 Precipitación Máxima Probable (PMP)

La metodología de Precipitación Máxima Probable (PMP) surge cuando el objetivo del proyecto deja de ser "optimizar" frente a eventos frecuentes y pasa a ser evitar una falla catastrófica.

Conceptualmente, la PMP busca estimar la mayor precipitación meteorológicamente posible para una duración, un área y una localización dadas, considerando la física de las tormentas extremas y no, en primera instancia, una extrapolación estadística directa de series históricas.

Esta idea fue formalizada y estandarizada en manuales técnicos usados internacionalmente, que tratan la PMP como un valor límite práctico vinculado a tormentas máximas "razonablemente posibles" para el contexto regional y estacional.

A partir de esa precipitación límite se deriva la Crecida Máxima Esperable o Probable

Maximum Flood (PMF), que representa el hidrograma de crecida más severo concebible en una cuenca, resultante de combinar la PMP con condiciones hidrológicas "desfavorables" para maximizar el escurrimiento (humedad antecedente alta, fusión nival si corresponde, baja infiltración efectiva, sincronización de aportes, etc.).

En la práctica, la PMF no es "un número" sino un resultado de modelación hidrológica e hidráulica, donde la PMP funciona como insumo meteorológico extremo y el modelo traduce ese extremo en caudales y niveles, con foco en seguridad de presas, aliviaderos y estructuras críticas. Las guías de organismos técnicos enfatizan justamente esa finalidad: producir un escenario coherente y conservador para evaluar seguridad y niveles máximos en embalses y obras de retención.

El contraste con el tiempo de recurrencia es metodológico y, sobre todo, decisional. Como se presentó anteriormente, el tiempo de recurrencia nace del enfoque probabilístico, ya que se asocia a la probabilidad anual de excedencia (AEP) interpretada como un promedio de largo plazo entre años que registran excedencias de un umbral.

En este encuadre, el diseño opta por un nivel de protección "aceptable" (económico, social y legal), reconociendo que el evento de diseño tiene una probabilidad distinta de cero de ser excedido durante la vida útil.

La clave es entender que PMP/PMF no equivalen, estrictamente, a un período de retorno único, porque su lógica es otra: se pregunta "¿qué es razonablemente máximo?" más que "¿con qué frecuencia ocurrirá?".

En resumen, la PMF se usa típicamente como estándar de seguridad para infraestructuras críticas (donde la tolerancia a la falla es mínima), mientras que los diseños por recurrencia se reservan para niveles de servicio y desempeño donde el riesgo residual es admisible y gestionable.

5.3.2 Escenario II: series limitadas, transferencia regional y aumento de información efectiva

Cuando el registro o medición de variables hidrológicas necesarias para el diseño en el sitio es escaso, discontinuo o de calidad insuficiente, la estadística directa puede volverse inestable y altamente sensible a pocos datos.

En este escenario, el diseño se apoya en estrategias para aumentar la información efectiva: correlaciones con cuencas vecinas, regresiones regionales, transferencia de parámetros y análisis regional de frecuencias.

La idea central es que, bajo cierta homogeneidad hidrológica, varias cuencas comparten mecanismos de generación y, por lo tanto, propiedades estadísticas comparables. Así, un lugar o una cuenca, con datos incompletos puede apoyarse en información de otras cuencas análogas para reducir incertidumbre.

La validez de una transferencia no se prueba solo con un coeficiente de correlación. Requiere un argumento físico de similitud: morfometría, pendientes y almacenamiento, tipo de suelos y cobertura, grado de urbanización, presencia de control nival, y dominancia de tormentas convectivas u orográficas.

En gestión, esta exigencia equivale a evitar analogías superficiales: dos ríos cercanos pueden responder de manera distinta si uno tiene planicies de inundación amplias y el otro es encajonado, o uno puede estar regulado por embalses y el otro no. Por eso, una práctica defendible es combinar estadística con diagnóstico hidrológico y revisar residuales para detectar sesgos que suelen crecer justamente en el rango de eventos grandes.

En estudios de mayor rigurosidad, la regionalización se formaliza mediante análisis regional de frecuencias. Se define una región homogénea, se normalizan magnitudes por un índice local (por ejemplo, una crecida característica), y se estiman parámetros regionales con técnicas robustas como L-momentos.

Este enfoque tiende a estabilizar la estimación en retornos altos y ofrece una narrativa metodológica más sólida que una extrapolación puntual. Al presentar resultados, el informe debe declarar el grado de extrapolación y distinguir con claridad entre incertidumbre por falta de datos y variabilidad natural del proceso, porque ambas se perciben distinto en la toma de decisiones.

5.3.3 Escenario III: ausencia de aforos, lluvia de diseño y modelos lluvia-escorrentía

En cuencas sin registros de caudal, el diseño suele construirse transformando una precipitación de diseño en escorrentía mediante modelos conceptuales o semi-distribuidos, denominados "modelos lluvia/escorrentía" en general.

En este escenario la incertidumbre proviene de una cadena de estudios y adopciones: caracterización de la lluvia extrema, reducción areal, patrón temporal, pérdidas por infiltración y almacenamiento, y propagación hidrológica e hidráulica dentro de la cuenca.

La excelencia técnica no consiste en seleccionar un método "popular" o simplificado, sino en construir una cadena consistente de supuestos y parámetros respaldados por evidencia regional y por verificaciones indirectas.

La estimación de lluvia de diseño se apoya en curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) y en la elección de una duración crítica de la precipitación, consistente con el tiempo característico de la cuenca. Esta etapa implica que la lluvia de diseño no es solo un total precipitado, sino también una historia temporal (distribución temporal de la precipitación o hietograma), y esa historia influye fuertemente en los caudales máximos o pico del hidrograma.

Guías contemporáneas de diseño de tormentas remarcan que diferentes patrones temporales de precipitación pueden compartir la misma estadística IDF y, sin embargo, producir picos distintos, por lo que la elección del hietograma es una decisión importante dentro de la modelación.

Por otro lado, cuando el interés es la precipitación promedio o media sobre un área o cuenca, se requiere un factor de reducción areal que depende del tamaño de cuenca, duración y clima regional, porque la lluvia máxima puntual no ocurre simultáneamente en toda el área con la misma intensidad. Esto se define como la "distribución areal" de la tormenta de proyecto.

En la representación de pérdidas en la generación de escorrentía superficial suele utilizarse el método del Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS), actual Natural Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA), para formulaciones de proyectos, especialmente en cuencas pequeñas y urbanas.

El CN resume la propensión al escurrimiento superficial de la precipitación, en función del Grupo Hidrológico del suelo, la cobertura, el tratamiento, la condición hidrológica y la humedad antecedente, y su uso está documentado en guías como TR-55 y derivados operativos.

En términos de gestión, el CN es una forma de traducir decisiones territoriales (urbanización, compactación de suelos, pérdida de cobertura) en cambios de respuesta hidrológica; por eso, su selección debe estar sustentada por cartografía y por un relato coherente del estado de la cuenca, más que por una tabla elegida sin la crítica adecuada.

El tiempo de concentración (Tc) y la propagación hidrológica controlan la forma del hidrograma y condicionan la hidráulica del proyecto. Debido a que no suele haber calibración directa de los parámetros adoptados, es recomendable aplicar triangulación técnica para acotar el diseño: comparar resultados de diferentes fórmulas de tiempo de concentración dentro de rangos plausibles, contrastar picos con estimaciones regionales, revisar coherencia con evidencia geomorfológica y con controles hidráulicos observables, e incorporar marcas de crecida o relatos verificados cuando existan. Esta triangulación no elimina incertidumbre, pero la vuelve explícita y gestionable, evitando el error frecuente de presentar una cifra con falsa precisión.

5.4 TIEMPO DE RETORNO, VIDA ÚTIL Y EVALUACIÓN DEL RIESGO HÍDRICO

La elección del tiempo de retorno TR es, en esencia, una decisión de gestión del riesgo. La obra no se evalúa en un año aislado, sino a lo largo de su vida útil, y por ello la comunicación técnica debe traducir el criterio anual a un criterio en horizonte de proyecto.

Bajo estacionariedad e independencia anual, la probabilidad o riesgo de que el evento de diseño sea excedido al menos una vez en los "n" años de la vida útil de la obra, es:

$$R = 1 - (1 - AEP)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n$$

Esta relación permite discutir con claridad el nivel de seguridad realmente adquirido o aceptado por todos los involucrados en un proyecto. Si se toma un evento de 100 años de tiempo de recurrencia, este tiene el 1% de probabilidad anual de excedencia, lo que puede parecer adecuado en general. Pero si se analiza la probabilidad de que a obra se rompa durante su vida útil de 50 años, el riesgo de rotura que se asume es de casi el 40%, y esa cifra suele ser más intuitiva para el público en general y los tomadores de decisión:

$$R = 1 - (1 - AEP)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^n$$

$$R_{50\ años}^{AEP=1\%} = 1 - (1 - 1\%)^{50} = 1 - \left(1 - \frac{1}{100}\right)^{50}$$

$$R_{50\ años}^{AEP=1\%} = 39.5\%$$

En gestión de riesgos, el riesgo se construye por la combinación de amenaza, exposición, vulnerabilidad y consecuencias. En diseño hidrológico, la amenaza se expresa mediante caudales e hidrogramas; la exposición y vulnerabilidad se expresan en el sistema físico y social que depende de la obra; las consecuencias se expresan en daños, interrupciones y, en los casos críticos, pérdida de vidas.

De allí surge el concepto de "riesgo residual", que muestra que, aun cumpliendo el estándar adoptado, la probabilidad de excedencia o de rotura, nunca es nula. Por lo tanto, el proyecto debe describir qué ocurre en escenarios de sobrepaso, cómo falla la obra y qué medidas complementarias reducen consecuencias, como ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, planes de contingencia y protocolos operativos.

Una manera madura de elegir el criterio, es analizar alternativas desde una perspectiva de costo total esperado. A mayor nivel de protección, mayor inversión inicial; a menor nivel de protección, mayor costo esperado de daños y pérdidas por interrupción. Aunque esta optimización puede ser formal, en muchos proyectos se aplica de manera cualitativa, pero aun así conviene documentar el razonamiento y realizar análisis de sensibilidad: cómo cambian los caudales si varía la distribución temporal elegida, el método de estimación, la humedad antecedente o la lluvia de entrada. La trazabilidad no solo mejora la calidad técnica; facilita auditorías, coordinación interinstitucional y diálogo con aseguradoras y organismos de control.

Dado que el riesgo residual es ineliminable, su gestión integral requiere complementar las obras físicas con medidas no estructurales que reduzcan las consecuencias del sobrepaso.

Estas incluyen el ordenamiento territorial para evitar la urbanización en zonas de riesgo residual, el establecimiento de sistemas de alerta temprana, protocolos operativos de emergencia y la contratación de seguros. La trazabilidad de este razonamiento en los informes técnicos permite que el gestor entienda exactamente qué condiciones ponen al sistema cerca de su límite operativo y qué indicadores deben monitorearse para revisar las decisiones de diseño en el futuro.

De más está decir que la mejor manera de disminuir el riesgo residual es realizar un mantenimiento operativo de todo el sistema, tanto en forma periódica como luego de eventos de mayor magnitud.

Es muy común en obras de defensa aluvional que, durante varios años, no se produzca la creciente de diseño, pero si se producen anualmente varios eventos menores. Estos eventos, no generan riesgo directo sobre la estructura, pero si van modificando lentamente las condiciones de diseño: caída de árboles dentro de un colector, sedimentación acumulada año a año, rotura localizada de algún bordo, etc.

El problema grave se presenta al momento de producirse la creciente de diseño, en un sistema que no está en las condiciones necesarias para esta magnitud de exigencia, fundamentalmente porque no se han realizado las tareas periódicas de mantenimiento de todo el sistema.

O sea, la falta de mantenimiento durante la operación del sistema hace que éste vaya perdiendo, de a poco, la capacidad original, sin que hayan producido eventos graves que alerten de esta situación.

5.4.1 No estacionariedad y diseño adaptativo

El cambio climático y las transformaciones del territorio cuestionan el supuesto de estacionariedad que sostiene la interpretación clásica del tiempo de retorno. El IPCC-AR6 evalúa cambios observados y proyectados en extremos, incluyendo precipitación intensa, e insiste en que los extremos pueden cambiar con el calentamiento y con variaciones regionales.

Cuando la probabilidad anual de excedencia evoluciona con el tiempo, el riesgo durante la vida útil no se resume con un único TR constante; el diseño debe considerar horizonte temporal, escenarios y márgenes de seguridad explícitos, especialmente cuando incrementos moderados en extremos pueden comprometer el nivel de servicio.

Una estrategia robusta ante la incertidumbre profunda es el diseño adaptativo. Este enfoque no pretende adivinar el futuro, sino diseñar con capacidad de ajuste: soluciones por etapas, reservas geométricas para ampliaciones, puntos de decisión definidos y un plan de monitoreo que permita recalibrar si las condiciones observadas divergen de las hipótesis de proyecto.

En gestión hídrica, esto implica una política con revisiones programadas: se implementa una medida, se observan indicadores, y se ajusta el curso. En proyectos, el diseño adaptativo requiere declarar qué variables se monitorearán, qué umbrales activarán intervenciones y qué acciones están previstas, de modo que la resiliencia sea parte del proyecto y no una expectativa posterior.

5.5 HIDROGRAMA DE DISEÑO Y VERIFICACIÓN HIDRÁULICA

Luego de transitar la formulación del proyecto por alguno de los escenarios antes descriptos, se obtiene como resultado un hidrograma de diseño, que define cómo varía el caudal de proyecto a lo largo del tiempo que dura la crecida. Este hidrograma de diseño es la interfaz natural con la hidráulica y la ingeniería estructural.

No basta con estimar un caudal máximo de la crecida o pico, ya que la respuesta hidráulica depende de la temporalidad del aporte, del almacenamiento en el la cuenca, de controles locales, de la rugosidad, de la interacción con sedimentos y del estado de operación de compuertas o alcantarillas.

Por lo tanto, el estudio hidrológico debe entregar hidrogramas consistentes con el mecanismo generador del evento y documentar cómo se obtuvieron. Esta documentación es clave para que el equipo hidráulico y estructural pueda verificar niveles, velocidades, tensiones de corte, socavación y estabilidad, y para que el gestor entienda qué condiciones ponen al sistema cerca del límite operativo.

El circuito técnico se completa cuando el informe explica cómo la incertidumbre hidrológica se propagó hasta decisiones de dimensionamiento y qué margen de seguridad se adoptó.

En obras críticas, esta propagación se puede tratar de manera explícita con análisis probabilístico o, al menos, con escenarios de sensibilidad que representen colas o eventos extremos posibles. En todos los casos, el informe debe describir el modo de falla esperado bajo sobrepaso, o sea, si la obra se sobrecarga, es preferible que falle de manera progresiva y controlable, con rutas de alivio y redundancias, antes que de forma frágil y repentina.

5.6 PARALELO METODOLÓGICO ENTRE GESTIÓN HÍDRICA, DISEÑO HIDROLÓGICO Y GESTIÓN DE RIESGOS

Si se observa con detenimiento, la diferencia entre un plan de gestión hídrica, un estudio de diseño hidrológico y un plan de gestión de riesgos es más de lenguaje que de estructura.

La gestión hídrica suele planificar y formular objetivos como abastecimiento poblacional, riego agrícola, control de inundaciones, calidad de agua y preservación ecosistémica, y define reglas de operación e instrumentos de coordinación.

El diseño hidrológico, en cambio, formula objetivos de desempeño para una obra, sistema o proyecto, define solicitaciones y parámetros para dimensionar, e incorpora los riesgos asociados.

La gestión de riesgos formula objetivos de protección y continuidad, define criterios de aceptabilidad y selecciona tratamientos. La norma ISO 31000 sintetiza este proceso como un marco de principios, una estructura de gobernanza y un proceso iterativo de identificación, análisis, evaluación y tratamiento, con comunicación, monitoreo y mejora continua.

En hidrología aplicada, la identificación del riesgo equivale a identificar mecanismos generadores y escenarios: crecidas pluviales rápidas, aluviones con alta carga sólida, crecidas nivales de larga duración, obstrucción por sedimentos o residuos, coincidencia de picos con mareas o niveles en un río principal, y eventos compuestos.

El análisis del riesgo equivale a cuantificar frecuencias y magnitudes con estadística o modelación, y a traducirlas en variables hidráulicas relevantes. La evaluación del riesgo equivale a contrastar esos resultados con criterios de desempeño y consecuencias, lo que conduce a elegir tiempos de retorno o probabilidades objetivo que se relacionan con la vida útil.

Finalmente, el tratamiento del riesgo equivale a seleccionar alternativas estructurales (aumentar capacidad, retener, derivar) y no estructurales (ordenamiento, alerta temprana, mantenimiento, seguros), sabiendo que ninguna elimina por completo el riesgo residual.

Este paralelo también ayuda a ordenar conceptos estadísticos que suelen generar confusión:

- √ la probabilidad anual de excedencia (AEP) es un lenguaje de riesgo, no un atributo del río;
- √ el tiempo de retorno (TR) es una forma de expresar esa probabilidad, no un calendario;
- √ los intervalos de confianza expresan la incertidumbre por muestra finita, no la variabilidad del clima;
- √ la incertidumbre de modelo se suma a la estadística y rara vez se ve en una sola cifra.

En gestión, una comunicación efectiva consiste en traducir estos conceptos a decisiones: qué probabilidad de pérdida se asume, qué margen se incorpora, qué costos se aceptan y qué indicadores se monitorean para revisar la decisión.

5.7 CASO DE ESTUDIO: PROYECTO INTEGRAL REDUCCIÓN - LOS ANDES

5.7.1 Componente de Defensa Aluvional

El objetivo de esta componente es desarrollar un sistema de defensa aluvional que mitigue los graves inconvenientes producidos por el sistema de escurrimiento superficial torrencial de las cuencas que afectan la zona irrigada por los canales Reducción y Los Andes, así como a las zonas urbanas de margen derecha del Río Tunuyán Inferior.

Las obras ya ejecutadas, resultantes de esta formulación, se sitúan en el Departamento de Rivadavia, en la Provincia de Mendoza, siendo una región de clima templado árido donde las tormentas convectivas generan torrentes que arrastran sedimentos y piedras, los que destruían periódicamente los colectores y defensas aluvionales existentes antes de la obra, al antiguo canal de riego principal con numerosos cortes de la dotación de riego y afectando la producción de 13.000 hectáreas cultivadas y la seguridad de varios sectores urbanos de la zona.

5.7.2 Situación sin proyecto

El principal problema de orden natural que se presentaba en el área cultivada, así como en la semiurbana, era el de los torrentes, los cuales se presentaban eventualmente cada vez que ocurría una intensa lluvia en la zona alta de margen derecha del Río Tunuyán, arrastrando sedimentos, lodo y piedras que descargaban en varios tramos del Canal Matriz Reducción y de su continuación, la Rama Los Andes.

Este inconveniente ocasionaba desbordes y roturas sobre la margen izquierda de ambos canales, causando inundaciones de calles y cortando el suministro de agua para riego, lo que generaba inseguridad para los cultivos y bienes de la zona e implicaba una grave situación de riesgo para la población de los distritos de la zona de influencia.

Tanto el Canal Matriz Reducción y la rama Los Andes tenían sus trazas paralelas al río (dirección oeste/este) y perpendiculares a los cauces aluvionales (dirección sur/norte) que transportaban los escurrimientos de las cuencas superiores, abarcando estas un área de aproximadamente 610 km².

Estos problemas sucedían generalmente en los meses de mayor precipitación, siendo coincidentes con los meses de mayor demanda de riego, o sea, entre noviembre y febrero. Las precipitaciones que originaban estos problemas son de tipo convectiva, con núcleos que llegaban a tener 20 km de desarrollo vertical y que también son origen de graves precipitaciones de granizo.

El tiempo que se empleaba para reparar estas roturas e inundaciones provocaba un importante perjuicio al dejar sin riego el área cultivada durante períodos variables según

la intensidad de los daños, en una etapa crítica para los cultivos. Los afluentes mencionados determinaban que el canal matriz se encontraba sobredimensionado para las necesidades de riego, aunque por no estar impermeabilizado, padecía los problemas aluvionales que lo inundaban y rompían, en muchos casos al sumarse los caudales de riego y aluvionales.

Otro inconveniente importante era la inundación de varios sectores urbanos por el uso de las calles como cauces aluvionales, las que conducían las crecientes desde la zona del canal hasta el río Tunuyán, ocasionando roturas en viviendas e infraestructuras en general.

5.7.3 Área de Influencia

El área total involucrada en este estudio es aproximadamente de 760 km², de los cuales corresponden 150 km² al área cultivada y semiurbana a defender; y 610 km² a áreas naturales de las cuencas aluvionales.

En el Cuadro 5.2 se muestran las áreas involucradas en el estudio:

- Sector urbano y bajo riego
- Sector 1 de cuencas aluvionales
- Sector 2 de cuencas aluvionales
- Sector 3 de cuencas aluvionales

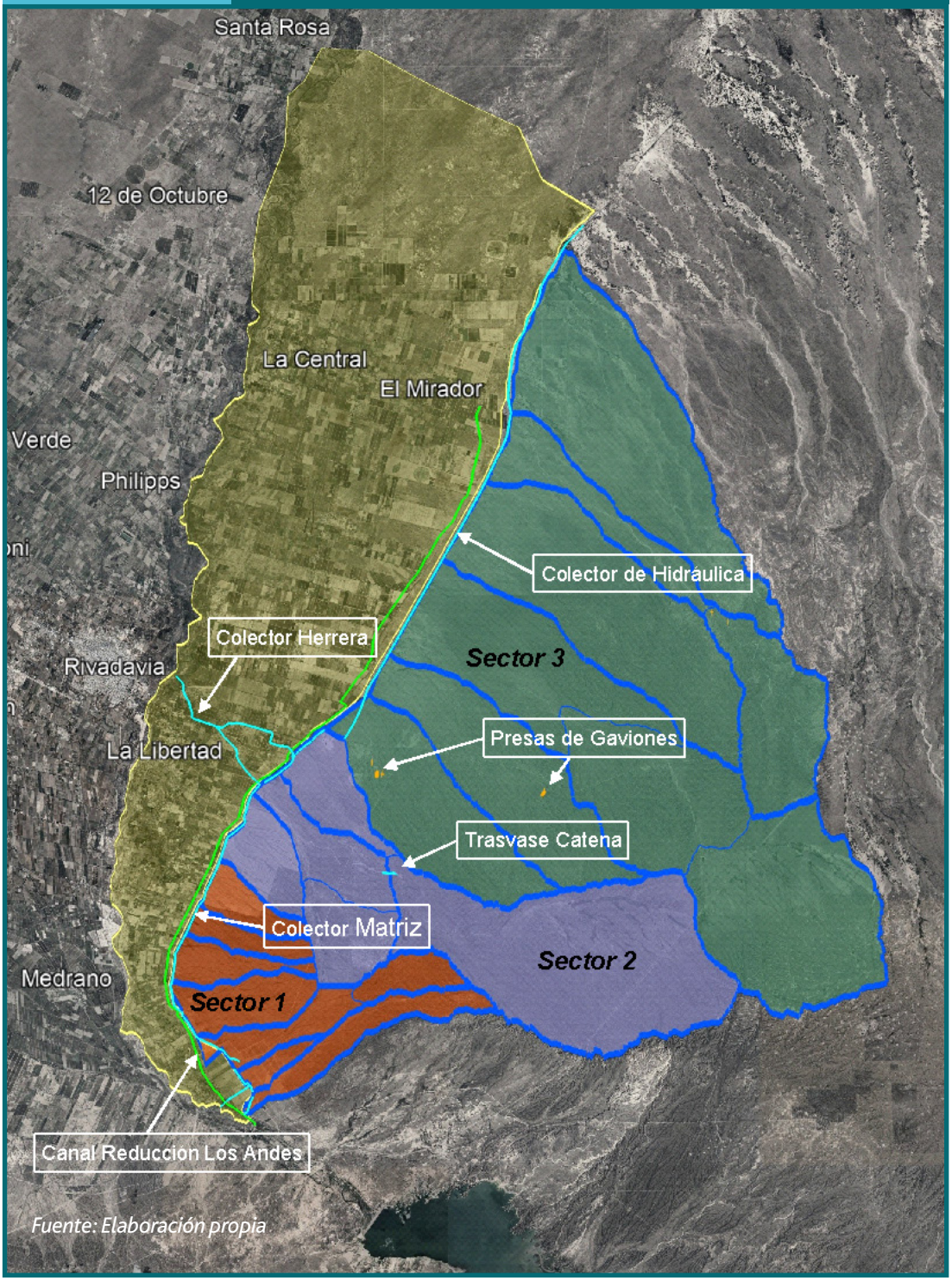
Como se mencionara, del área involucrada en la problemática aluvional abarca una superficie aproximada de 610 km², la que se dividió en los tres sectores indicados previamente:

√ Sector 1: comprende un área de 63 km² en el extremo noroeste del sector aluvional. Es un sector de cuencas chicas (con áreas entre 3 y 14 km²) con posibilidades de descarga de escurrimientos hacia el Río Tunuyán a través de calles canales de poca longitud o refuncionalización del canal de riego a colector aluvional. Presentaba tres cruces aluvionales (por sifón o por puentes canal) sobre el Canal Matriz Reducción (prog. 650 m, 1300 m y 1650m); y 8 calles urbanas que conducían crecientes, las que en algunos casos estaban preparadas para operar como calle/canal (Ramírez, Acevedo, Cuello, Cano, Gaviola, Ozán, Lucero y Zanjón).

√ Sector 2: abarca un área de 129.5 km² en la parte central del proyecto, con cuencas cuyas superficies varían entre 10 y 98 km², y donde existían importantes obras de infraestructura de descarga hacia el Río Tunuyán, conocidos como "ríos secos" o colectores aluvionales (Herrera y Pavlovski) y 3 calles urbanas con descargas aluvionales a río (González, Maldonado y Ortiz).

√ Sector 3: es el sector más grande de los tres con una superficie total de 417.5 km² sobre el extremo sur-sureste del área de proyecto. Está formado por grandes cuencas alargadas, con dirección preponderante suroeste/noreste, cuyas superficies están entre 37 y 133 km². Existía el colector aluvional de Hidráulica y 5 calles urbanas aluvionales (Galigniana, Ortega, Arroyo, El Mirador y Pimiento).

Cuadro 5.2 **Sistema de Defensa Aluvional Reducción Los Andes**



Fuente: Elaboración propia

Salvo en los puntos de cruce entre el canal y los cauces aluvionales, en donde se han construido obras aluvionales (caso del sifón Herrera, por ejemplo), el mecanismo de cruce de las aguas de un sector a otro del canal presenta ciertas características que se evaluaron.

Si bien los cauces aluvionales eran perpendiculares a la traza del canal, éste funcionaba como un distribuidor de la crecida que a él llegaba. Los caudales aluvionales se incorporaban directamente al canal, superando el bordo de margen derecha, límite físico que lo separa de la cuenca. El canal trabajaba a sección llena desbordando en múltiples puntos. Estos pequeños vertederos formados a lo largo de la traza del canal desbordaban hacia aguas abajo, alimentando todo el frente de fincas del lado norte del canal. Estos pequeños vertederos son los que conformaban las múltiples roturas de la margen izquierda del canal reportadas (hasta 100 en una tormenta según información de los operadores del canal).

Estas descargas eran colectadas por el sistema de riego de las fincas aledañas o por los caminos paralelos al canal y conducidos a las calles perpendiculares a éste, las que funcionaban como calles canal y presentaban pendientes elevadas hacia el río.

5.7.4 Cuencas Aluvionales

La subdivisión del área aluvional total fue en 16 cuencas (ver Cuadro 5.3) a las que se les midieron los parámetros de cuenca estándar (Cuadro 5.4), como: área, perímetro, longitud del cauce principal y alturas mínimas y máximas. Los parámetros morfométricos deducidos, o calculados, de mediciones directas, utilizados en la modelación matemática, o para comparación de cuencas, fueron los siguientes:

- Kc Coeficiente de compacidad, adimensional
- S_{ov} Pendiente de laderas (overlanflow), adimensional
- Dd Densidad de drenaje, km/km^2
- S_{Lc} Pendiente media del cauce principal, adimensional
- S'_{Lc} Pendiente media ponderada del cauce principal, adimensional
- Tc Tiempo de concentración, hs
- L_{ov} Longitud de escorrentía superficial (overlanflow), km

Coeficiente de Compacidad (Kc) o Índice de Grevelius: es la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de igual área. No da idea de lo irregular de la forma de la cuenca, mientras más alargada sea, mayor es el Kc y menor probabilidad de crecientes debido a mayores tiempos de concentración y mayores tránsitos de los caudales. Se calcula de la siguiente forma:

$$Kc = P/(2 * \pi * r)$$

$$A = \pi * r^2 \Rightarrow r = \sqrt{A/\pi}$$

$$Kc = P/(2 * \pi * \sqrt{A/\pi}) = 0.28 * P/\sqrt{A}$$

Cuadro 5.3 **Cuencas aluvionales - Denominación**

Bloque Riego	Sector Aluvional	N°	Cuenca	N°	Subcuenca
I	N°1	510	La Ventana		
		520	La Agustina		
		530	Acevedo	531	Acevedo Superior
				532	Acevedo Inferior
		540	Quebrada del Abuelo		
		550	Ozán		
		560	Los Indios		
		570	Zanjón		
	N°2	580	Barrancones		
		590	Herrera	591	Herrera Superior
				592	Herrera Inferior
		600	Gringo Muerto	601	Gringo Muerto Superior
				602	Gringo Muerto Inferior
II	N°3	610	Ortega		
		620	Arroyo		
		630	Phillips	631	Phillips Superior
				632	Phillips Media
				633	Phillips Inferior
		640	La Bandera	641	La Bandera Izquierda
				642	La Bandera Derecha
		650	El Mirador	651	El Mirador Superiror
				652	El Mirador Inferior
		660	Boscariol		

Fuente: Elaboración propia

Densidad de Drenaje (Dd): es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y el área total. Usualmente tiene valores que varían entre 0.50 a 3.5 km/km², para cuencas pobremente drenadas hasta excepcionalmente bien drenadas, respectivamente. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$Dd = \frac{L_R}{A}$$

En donde:

L_R longitud total de los cauces aluvionales de la cuenca, en km

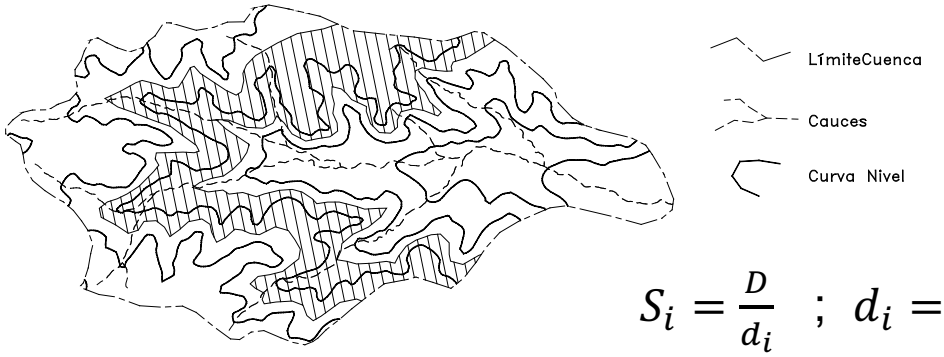
Pendiente de Laderas (Sov): es una característica que controla, en buena medida, la velocidad con que se da la escorrentía superficial (overlanflow) y afecta el tiempo que lleva al agua de la lluvia para concentrarse en los lechos aluvionales (Cuadro 5.5). El método para determinar la pendiente ponderada de la cuenca parte del trazado de curvas de nivel:

Cuadro 5.4 Cuencas aluvionales - Parámetros

N°	Nombre	A [km²]	P [km]	Lc [km]	$H_{mín}$ [msnm]	$H_{máx}$ [msnm]
510	La Ventana	12.45	27.44	14 298.49	729	918
530	Acevedo Total	16.09	30.02	14 390.06	724	893
532	Acevedo Inferior	9.36	19.48	8 760.86	724	823
531	Acevedo Superior	6.74	13.10	5 771.29	815	893
520	La Agustina	3.08	9.66	3 781.63	735	790
540	Quebrada del Abuelo	12.21	16.35	6 611.33	724	805
550	Ozán	7.35	15.70	6 367.03	719	807
560	Los Indios	5.83	13.73	6 153.10	713	807
570	Zanjón	7.02	13.20	5 422.62	713	803
580	Barrancones	11.16	15.20	5 154.15	708	798
590	Herrera Total	26.87	26.78	11 939.29	699	847
592	Herrera Inferior	13.74	20.62	9 981.09	699	833
591	Herrera Superior	13.13	16.07	6 638.64	754	848
600	Gringo Muerto	90.68	62.64	29 670.75	698	1053
601	Gringo Muerto Superior	72.80	44.63	20 393.57	823	1053
602	Gringo Muerto Inferior	17.88	31.41	13 952.79	698	910
610	Ortega	38.78	31.33	14 065.85	693	923
620	Arroyo	44.07	36.66	17 626.08	688	958
630	Phillips	140.05	71.05	33 070.24	683	1123
631	Phillips Superior	56.78	32.55	13 702.18	935	1124
632	Phillips Media	39.12	27.98	12 117.24	813	979
633	Phillips Inferior	44.16	37.71	15 334.73	678	934
640	La Bandera	68.67	42.15	18 777.60	668	964
641	La Bandera Izquierda	34.38	38.43	18 743.15	673	972
642	La Bandera Derecha	34.29	35.57	18 055.37	663	932
650	El Mirador	47.32	55.60	26 356.58	648	987
651	El Mirador Superior	28.51	26.96	12 862.20	838	987
652	El Mirador Inferior	18.81	30.27	13 815.44	648	852
660	Boscariol	74.70	47.66	16 942.73	678	903

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5.5 Determinación de Pendiente de Laderas



$$S_i = \frac{D}{d_i} \quad ; \quad d_i = \frac{A_i}{L_i}$$

En donde:

L_i	longitud de la curva de nivel "i" dentro de la cuenca, en km
D	equidistancia de las curvas de nivel, en m
d_i	ancho medio de la banda, en km
L_{CN}	longitud total de todas las curvas de nivel de la cuenca, en km
S_i	pendiente media de la banda "d_i"
A_i	área de la banda "d_i", en km²

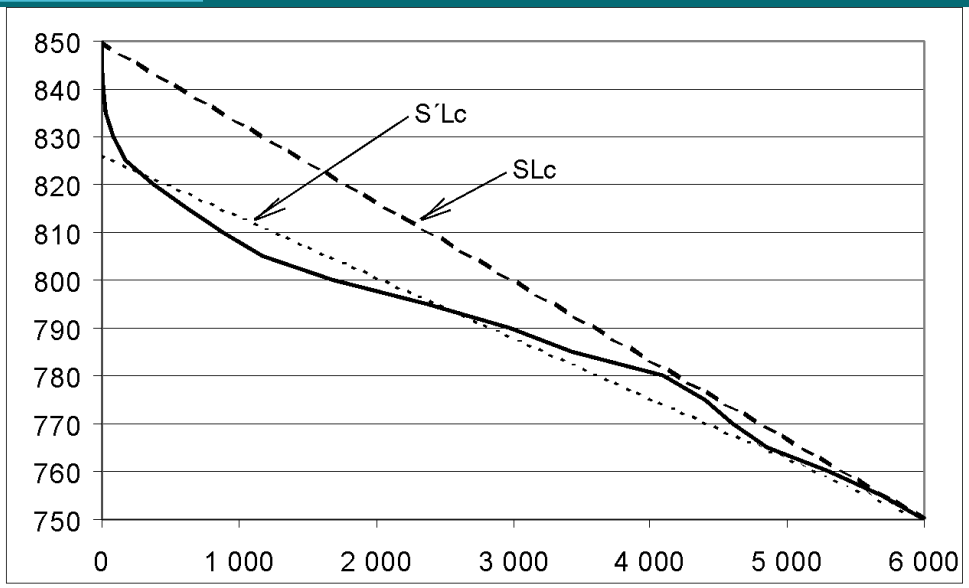
Suponiendo que el área parcial tenga peso sobre la pendiente parcial, o sea que se pondera la pendiente en función del área, se tiene que:

$$S_{ov} = \frac{\sum S_i * A_i}{\sum A_i} = \frac{\sum \frac{D * L_i}{A} * A_i}{A} = \frac{\sum D * L_i}{A} \frac{D * \sum L_i}{A} = \frac{D * L_{CN}}{A}$$

Pendiente Media del Cauce Principal (SLc): se calcula como la relación de variación de altura respecto a la longitud del cauce principal (Cuadro 5.6), mediante la fórmula:

$$S_{Lc} = \frac{H_{Máx} - H_{Mín}}{Lc}$$

Cuadro 5.6 **Perfil Teórico del Cauce Principal**



Fuente: Elaboración propia

Pendiente Media Ponderada del Cauce Principal (S´Lc): la pendiente de los cauces influye significativamente sobre la velocidad del flujo y sobre la forma del hidrograma de la cuenca. En el gráfico siguiente se presenta el perfil longitudinal del cauce principal y la representación de la dos pendientes evaluadas, la media (SLc) y la media ponderada (S´Lc). Como generalmente los perfiles de cauces aluvionales son cóncavos hacia arriba, se ve que la pendiente media ponderada representa mejor la forma del cauce real. La ponderación se realiza en función de que las áreas, del perfil real del cauce, por debajo y por encima de la línea S´Lc sean iguales.

$$S'_{Lc} = \frac{H' - H_{Mín}}{Lc} = \frac{\frac{2 * A_{Lc}}{Lc} - H_{Mín}}{Lc}$$

En donde:

A_{Lc} área por debajo del perfil real del cauce principal

Tiempo de Concentración (Tc): es el tiempo que la lluvia, que cae en el punto más distante de la corriente de agua de la cuenca, tarda para llegar a la sección de control. Como es un parámetro imposible de medir, se utilizan fórmulas empíricas deducidas en forma estadística en cuencas de regiones similares geomorfológicamente a las evaluadas en este estudio. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$Tc_{|hs|} = 0.335 * \left(\frac{A_{|km^2|}}{\sqrt{S'_{Lc|‰|}}} \right)^{0.593}$$

Longitud de Escorrentía Superficial (Lov): se define como la distancia en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre el terreno (overlanflow), en caso de que la escorrentía se diese en línea recta desde donde cae hasta el cauce más cercano. Se calcula con la fórmula:

$$L_{ov} = \frac{A}{2 * L_{RIO}}$$

En donde:

L_{RIO} longitud total de todos los cauces de la cuenca, en km

5.7.5 Tormenta de Proyecto

La Provincia de Mendoza cuenta con la generación de curvas IDF y tormenta tipo, denominada Tormenta de Proyecto Mendoza (TPM). Ésta fue generada con los registros históricos de estaciones meteorológicas de la red de pluviómetros automáticos que posee el Instituto Nacional del Agua (INA), por lo que se adoptó esta información como base para la generación de precipitaciones de proyecto, necesarias en el proceso lluvia/escorrentía para determinar los caudales aluvionales de cada una de las cuencas definidas.

Es importante recordar que este estudio se realizó entre los años 2002 y 2003, por lo que se utilizó la "vieja" tormenta de proyecto publicada por el Centro Regional Andino del INA, ver Cuadro 5.7. Posteriormente, en el año 2008 este centro de investigación publicó la actualización de estas curvas IDF (Ver la actualización en Capítulo 11).

Según la bibliografía especializada, el tiempo de retorno que se adopta para este tipo de estudios varía entre 50 y 100 años, dependiendo de la importancia de las zonas o infraestructuras a defender. Se realizaron evaluaciones previas que indicaron como razonable la adopción de un TR de 75 años. La lámina máxima puntual en el núcleo de la tormenta de diseño se interpoló entre los valores informados por el INA, adoptándose un valor de 103.0 mm. Cabe aclarar que en la etapa de Prefactibilidad de la formulación, se utilizó un TR de 100 años, con una lámina puntual de 109.6 mm.

5.7.5.1 Distribución Temporal

De acuerdo al estudio del INA, de ese momento, la duración típica de las tormentas convectivas en nuestra zona es de 60 minutos, con una discretización de 5 minutos. La distribución temporal total de la tormenta de proyecto adoptada es la que se muestra en el Cuadro 5.8.

5.7.5.2 Distribución Areal

En general, la metodología a seguir para la determinación de la precipitación media en cada cuenca, o grupo de cuencas, es colocar un núcleo de tormenta en cada cuenca de aporte. No obstante, y considerando la extensión de las cuencas aluvionales en estudio, se consideró aplicar distintos núcleos de tormenta según la extensión de las cuencas o sectores de trabajo.

En el análisis de las distintas tormentas ocurridas en Mendoza, se detectó que la probabilidad de que existan más de 3 núcleos de tormenta actuando simultáneamente es muy baja.

La plantilla standard de isoyetas adoptada es la típica de tormentas convectivas, o sea, una serie de elipses concéntricas con una relación de eje mayor a eje menor igual a 1,50.

Fuente: Centro Regional Andino del INA

Instituto Nacional del Agua
Centro Regional Andino

TORMENTA DE PROYECTO EN BASE A MEDICIONES EN EL PEDEMONTE DEL GRAN MENDOZA

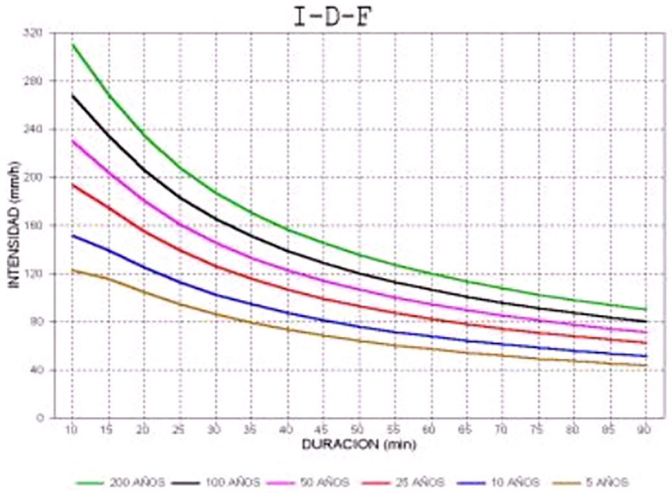


TABLA AREA-LAMINA

AREA [km2]	LAMINA MEDIA EN % DEL MAXIMO
0 - 1	100
1 - 5	88,9
5 - 10	81,4
10 - 15	77,8
15 - 20	74,3
20 - 25	71,6
25 - 50	66,0
50 - 75	60,6
75 - 100	55,5
100 - 200	55,4
200 - 300	44,7
300 - 500	40,9
500 - 600	36,6
600 - 700	35,6
700-1000	31,1

DISTRIBUCION TEMPORAL

Período (min)	5	10	15	20	25	30
Distribución (%)	10.1	27.3	41.5	15.4	4.8	0.9

Período (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Distribución (%)	4.1	2.4	8.7	15.4	20.9	28.8	11.9	5.5	1.6	0.5	0.1	0.1

Período (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Distribución (%)	2.9	0.2	0.1	3.4	4.2	6.3	7.2	8.6	18.0	10.4	16.2	12.9	4.7	1.8	1.8	2.0	0.2	0.1

Con la financiación de CONICMEN y CONICET

Mendoza, agosto 1997

Teniendo en cuenta lo mencionado, se maximizó la posibilidad de ocurrencia simultánea de núcleos de tormentas considerando que los mismos registran una cobertura superficial máxima entre 30 y 50 km². Además, si se consideran los procesos meteorológicos que generan los núcleos convectivos, se adoptó el criterio de que la distancia mínima entre núcleos simultáneos es de 14 km.

Cuadro 5.8 **Distribución Temporal Total de la Tormenta – TR = 75 años**

ÁREA	Duración												Total
km²	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	mm
0 a 1	4.2	2.5	9.0	15.9	21.5	29.7	12.3	5.7	1.6	0.5	0.1	0.1	103.0
1 a 5	3.8	2.2	8.0	14.1	19.1	26.4	10.9	5.0	1.5	0.5	0.1	0.1	91.6
5 a 10	3.4	2.0	7.3	12.9	17.5	24.1	10.0	4.6	1.3	0.4	0.1	0.1	83.8
10 a 15	3.3	1.9	7.0	12.3	16.8	23.1	9.5	4.4	1.3	0.4	0.1	0.1	80.1
15 a 20	3.1	1.8	6.7	11.8	16.0	22.0	9.1	4.2	1.2	0.4	0.1	0.1	76.5
20 a 25	3.0	1.8	6.4	11.4	15.4	21.2	8.8	4.1	1.2	0.4	0.1	0.1	73.7
25 a 50	2.8	1.6	5.9	10.5	14.2	19.6	8.1	3.7	1.1	0.3	0.1	0.1	68.0
50 a 75	2.6	1.5	5.4	9.6	13.0	18.0	7.4	3.4	1.0	0.3	0.1	0.1	62.4
75 a 100	2.3	1.4	5.0	8.8	11.9	16.5	6.8	3.1	0.9	0.3	0.1	0.1	57.2
100 a 200	2.3	1.4	5.0	8.8	11.9	16.4	6.8	3.1	0.9	0.3	0.1	0.1	57.1
200 a 300	1.9	1.1	4.0	7.1	9.6	13.3	5.5	2.5	0.7	0.2	0.0	0.0	46.0
300 a 500	1.7	1.0	3.7	6.5	8.8	12.1	5.0	2.3	0.7	0.2	0.0	0.0	42.1

Fuente: Elaboración propia

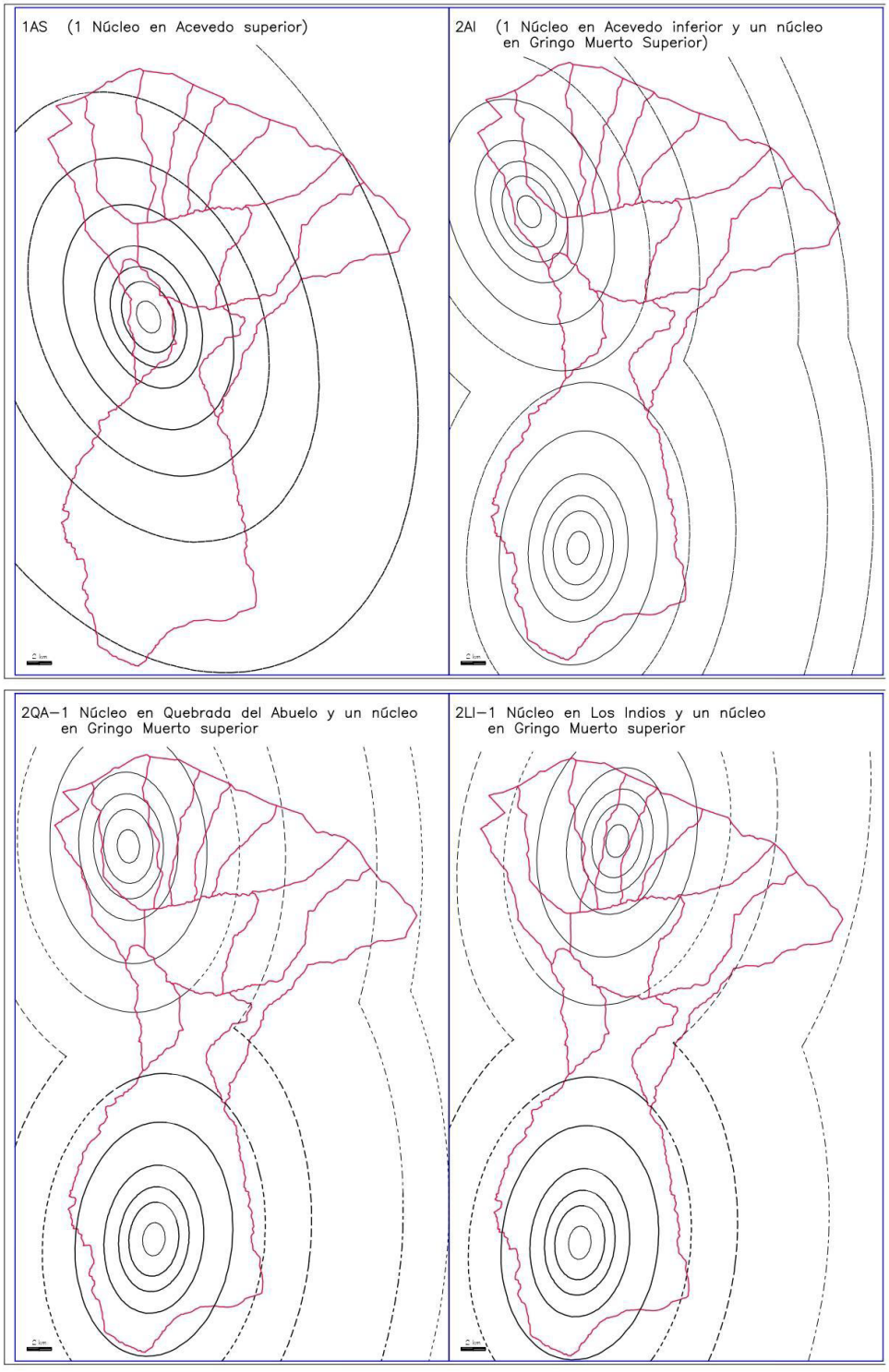
Estos criterios han convergido en el siguiente patrón de tormentas evaluado para cada sector de cuencas:

Sector 1 y 2 considerando el tamaño de las cuencas, y previendo que las soluciones a los inconvenientes aluvionales contemplarían la utilización del actual Canal Matriz Reducción, refuncionalizado, y calles canales como salidas al río, se consideró sucesivamente un núcleo de tormenta en cada una de las cuencas de estos sectores, precipitando en forma simultánea con un segundo núcleo en la cuenca de Gringo Muerto Superior. También se evaluó una tormenta con un único núcleo en Acevedo Superior, lo que maximiza los caudales en el primer tramo del colector matriz y da el hidrograma necesario para el estudio del trasvase de cuenca de Acevedo Superior a Herrera Superior (obra que no se construyó por ser menos eficiente que las adoptadas como solución). En total se evaluaron 12 tormentas distintas.

Sector 3 como este gran sector abarca más de las 2/3 partes del área total del proyecto y previendo el diseño de obras en las cuencas (colectores, presas pequeñas, etc.) se previó la simultaneidad de dos núcleos, uno actuando en cada cuenca aportante del colector de Hidráulica, y otro en Phillips Superior y/o El Mirador Superior. Se evaluaron 9 tormentas distintas.

Como resultado de la aplicación de estos conceptos, se obtuvieron un total de 21 tormentas de proyecto, con el objetivo de evaluar varias alternativas que maximizaran los caudales de diseño. Un ejemplo de 4 de ellas se muestra en el Cuadro 5.9.

Cuadro 5.9 Tormenta Proyecto – Alternativas de localización



Fuente: Elaboración propia

5.7.6 Geomorfología

Para el estudio, se relevaron visualmente los suelos que constituyen las distintas cuencas, en donde se verificó la validez de los estudios realizados por el DIGID 73 (clasificación Litológica y Geomorfológica de suelos).

Además, se visualizó que el mayor impacto en la zona es el petrolero, pero que han afectado principalmente la parte alta de las cuencas y las cuencas de aporte al embalse Carrizal, fuera del área actual de estudio.

Como parámetros geomorfológicos se utilizó el modelo del Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service), denominado Número de la Curva (CN), que estima el exceso de precipitación usando la ecuación siguiente:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

En donde:

P_e	lámina acumulada de lluvia para el tiempo t
Ia	abstracción inicial (pérdida inicial)
S	potencial máximo de retención

"S" es una medida de la capacidad de la cuenca para absorber y retener la precipitación de la tormenta. Hasta que la lluvia acumulada exceda la abstracción inicial, el exceso de la precipitación, y del escurrimiento, serán cero.

Las fórmulas empíricas más comúnmente utilizadas son:

$$I_a = 0.2 * S \qquad S = \frac{25400 - 245 * CN}{CN}$$

En donde:

CN	Número de Curva, varía entre ≈ 30 (suelos permeables con alta infiltración) y 100 (suelos impermeables)

El CN para una cuenca puede estimarse como una función de uso de la tierra o cobertura vegetal, tipo de suelo y humedad de antecedente, de acuerdo a las tablas publicadas por el SCS en el Informe Técnico 55 (normalmente llamado TR-55).

Para la modelación, y dado que el modelo es de parámetros concentrados, se adoptó un Número de Curva uniforme para cada una de las cuencas y un estado de Humedad Antecedente (CNIII) previendo un suelo semisaturado por lluvias anteriores.

5.7.7 Modelación Matemática

Para la modelación matemática del proceso lluvia/escorrentía, se simuló el escurrimiento directo del exceso de precipitación en las cuencas utilizando el modelo del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, desarrollado por la oficina del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC - Hydrologic Engineering Center), denominado Modelo de Sistemas Hidrológicos (HMS - Hydrologic Modeling System), versión 2.2.1 de noviembre de 2002.

La metodología seguida para la modelación fue la siguiente:

I. Superposición de los patrones de tormentas de proyecto sobre los sectores y/o cuencas, para calcular la precipitación media por el Método de las Isoyetas.

II. Generación del hietograma de tormenta correspondiente a la duración de 60 minutos adoptada, con intervalos de tiempo de 5 minutos, de acuerdo a lo indicado por la Tormenta de Proyecto Mendoza.

III. Cálculo de hietograma de precipitación efectiva en función del hietograma de tormenta y de las pérdidas por infiltración computadas a través del método de Número de Curva (CN) y la Abstracción Inicial (Ia).

IV. Cálculo del hidrograma de escurrimiento total de las cuencas, obtenido a través de la transformación producida por dos métodos: de la Onda Cinemática (Kinematic Wave) y el del Hidrograma Unitario de Clark.

Las 21 tormentas evaluadas se combinaron con distintas opciones de manejo de los escurrimientos (colectores, calles/colectores, trasvase, etc). Estas corridas del modelo se identificaron con la siguiente nomenclatura dividida en 4 partes representativas:

$$\begin{array}{cccc} KW & NAT & 2QA & 100 \\ \Uparrow & \Uparrow & \Uparrow & \Uparrow \\ 1^{o} & 2^{o} & 3^{o} & 4^{o} \end{array}$$

En donde:

1°	Indica el modelo de transformación lluvia/escorrentía utilizado:
KW	Onda Cinemática
CL	Hidrograma Unitario de Clark ó Tránsito de Avenida
2°	Indica el estado de circulación de escurrimientos en las cuencas:
NAT	Con el sistema actual de drenaje
COR	Utilizando calle/colector Ramírez
COC	Utilizando calle/colector Cano
3°	Distribución areal de la tormenta utilizada.
4°	Tiempo de retorno de la tormenta

Sólo a efectos de mostrar la serie de datos de caudales obtenidos por estas 21 tormentas y las distintas metodologías de modelación utilizadas, el Cuadro 5.12 es uno de los varios que se obtuvieron para definir los caudales máximos en cada sector de las obras.

5.7.8 Obras proyectadas

A continuación, se describen las obras divididas por sector y tipo, las cuales responden a los esquemas de el Cuadro 5.10, para el Sector 1 y 2, y el Cuadro 5.11, para el Sector 3.

Las obras propuestas para los sectores 1 y 2 fueron:

I. Adecuación del canal Matriz Reducción (deshabilitado para riego) a la función aluvional, mediante ampliación de sección hacia margen derecha, recrecimiento por sectores en margen izquierda, construcción de pasarelas y puentes vehiculares.

II. Construcción de 1 presa de gaviones en cuenca Quebrada del Abuelo.

III. Trasvase, en cota 807 msnm, de la cuenca Gringo Muerto hacia cuenca Herrera, mediante canal de trasvase de 450 metros y 30 metros de ancho de fondo, con taludes 1:1. Además se incluyó el terraplén de derivación de 4 metros de altura, talud 2:1 , protegido aguas arriba por colchonetas tipo reno o gaviones.

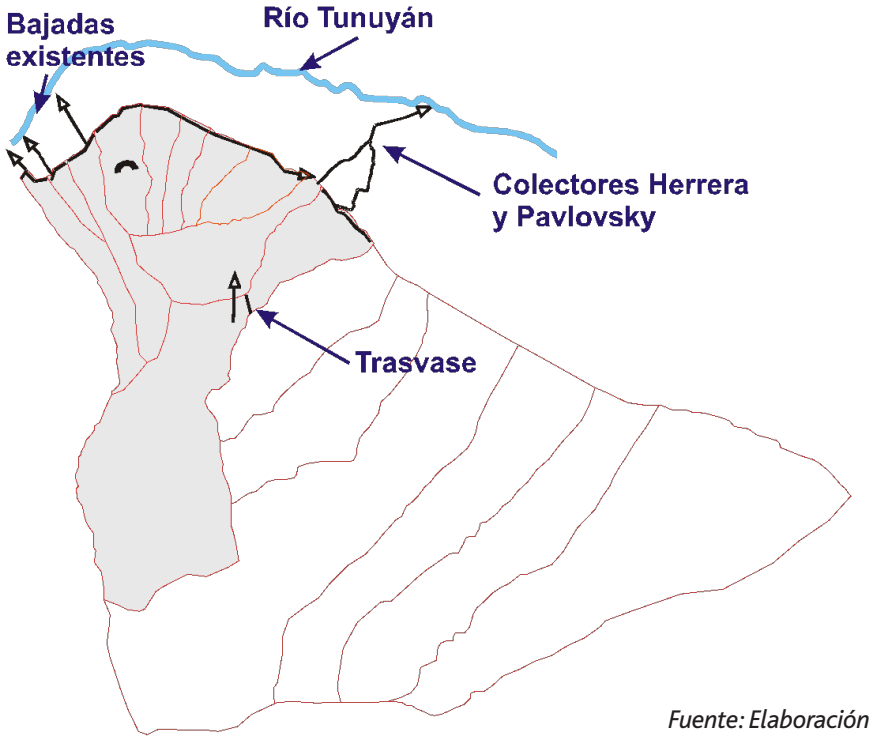
IV. Cauce del río seco Herrera: Redimensionado de sección, construcción de alcantarilla de luces múltiples en el cruce con la Ruta Prov. 62 y protecciones de enrocado.

V. Cauce Pavlosky: Redimensionado y eventuales protecciones de márgenes.

VI. Colector en cuenca Acevedo: Reacondicionamiento.

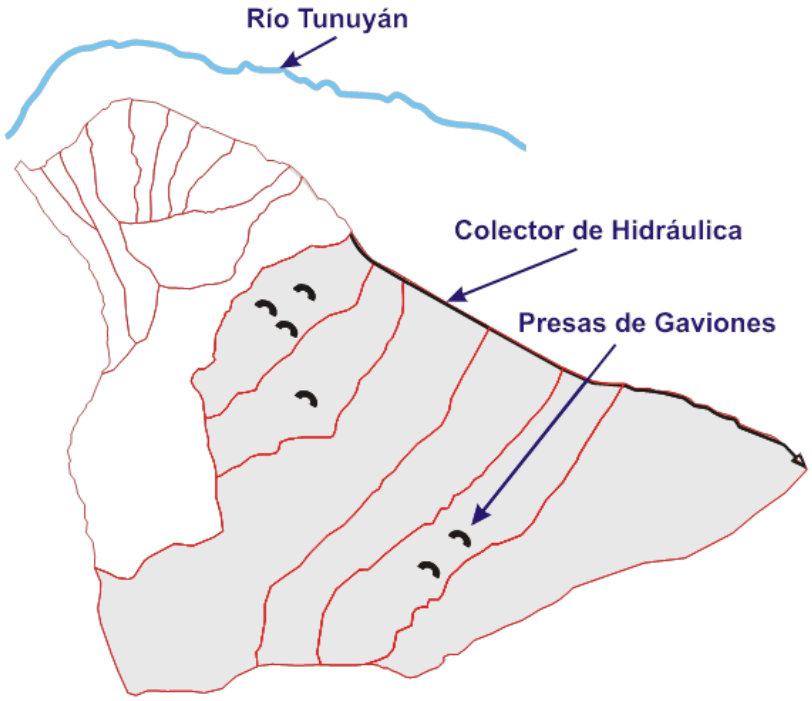
En este Sector 3, las obras propuestas comprendieron esencialmente presas de gaviones y redimensionamiento del colector de Hidráulica, con protecciones localizadas en margen izquierda frente a cauces importantes.

Cuadro 5.10 Esquema de Obras en Sector 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5.11 Esquema de Obras en Sector 3



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5.12 Caudales Sector 1 y 2, sin calle/colector, TR = 75, en m³/s

Elemento	KWN AT1A S075	KWN AT2A I075	KWN AT2Q A075	KWN AT2O Z075	KWN AT2L I075	KWN ATZ A075	KWNA T2B A075	KWN AT2H I075	KWN AT2H S075	KWN AT2G I075	CAUDAL DISEÑO
Acevedo Sup	21.1	4.4	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.6	6.6	2.1	21.1
Part Vignoni	21.1	4.4	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.6	6.6	2.1	21.1
Acevedo Inf	24.0	12.4	7.2	4.2	4.0	3.9	3.6	3.3	9.1	2.3	24.0
Col. 1	22.9	12.4	7.2	4.2	4.0	3.9	3.6	3.3	9.0	2.3	22.9
Part Ramirez	22.9	12.4	7.2	4.2	4.0	3.9	3.6	3.3	9.0	2.3	22.9
Col. 1'	22.1	12.3	7.2	4.2	4.0	3.9	3.6	3.2	8.9	2.3	22.1
Q del Abuelo	2.4	7.0	18.4	9.9	5.7	3.4	2.1	0.7	2.2	0.2	18.4
Col. 2	22.8	19.3	21.1	10.6	6.8	6.3	5.3	3.8	10.9	2.4	22.8
Part Cano	22.8	19.3	21.1	10.6	6.8	6.3	5.3	3.8	10.9	2.4	22.8
Col. 2'	22.8	19.3	21.1	10.6	6.8	6.3	5.3	3.8	10.9	2.4	22.8
Ozán	0.8	1.8	5.1	11.2	7.4	3.4	1.6	0.5	1.0	0.2	11.2
Col. 3	22.7	20.9	26.2	17.0	10.7	7.6	6.2	4.2	11.8	2.5	26.2
Los Indios	1.1	2.0	3.7	9.7	14.6	9.4	3.3	1.6	2.5	0.5	14.6
Col. 4	23.6	22.5	29.0	20.2	14.5	9.3	6.6	4.5	12.6	2.7	29.0
Zanjon	0.9	1.5	2.8	5.9	10.0	20.6	8.3	2.5	3.1	1.7	20.6
Col. 5	24.3	23.6	31.3	23.9	24.0	24.2	9.4	4.7	13.2	2.8	31.3
Barrancones	0.9	1.0	1.9	4.0	5.8	11.2	29.8	7.5	5.3	4.7	29.8
Col. 6	24.5	24.6	33.2	27.3	29.3	35.3	29.3	7.5	14.1	4.9	35.3
Part Pavlosky (br)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Trasv Pav-Herr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Part Sansoni (br)	8.9	34.5	34.3	34.5	34.5	34.5	34.5	36.4	35.9	34.5	36.4
Trasv GM-Her	8.9	34.5	34.3	34.5	34.5	34.5	34.5	36.2	35.7	34.5	36.2
Part Vignoni (br)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Trasv Ace-Herr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Herr Sup	8.6	1.4	5.2	5.9	7.1	7.7	7.0	9.8	28.7	3.9	28.7
Herr Inf	14.6	36.5	39.1	39.7	40.1	40.4	40.2	43.7	54.5	39.0	54.5
Col. Herr. Sup	37.8	60.6	70.4	65.0	59.9	56.6	52.7	51.2	58.3	43.4	70.4
GM Sup	8.9	34.5	34.3	34.5	34.5	34.5	34.5	36.4	35.9	34.5	36.4
Part Catena	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GM Inf	1.0	0.6	0.5	0.7	1.1	1.6	2.8	5.7	2.8	12.3	12.3
Part Pavlosky	1.0	0.6	0.5	0.7	1.1	1.6	2.8	5.7	2.8	12.3	12.3
Col. Pavlosky	1.0	0.6	0.5	0.7	1.1	1.6	2.8	5.7	2.8	12.3	12.3
Col. Herr. Inf	38.2	60.9	70.4	65.2	60.4	57.5	54.9	56.4	60.1	52.5	70.4
Part Cano (br)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Col. Cano	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Part Ramirez (br)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Col. Ramirez	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

5.8 CONCLUSIONES

El proyecto de Defensa Aluvional Reducción Los Andes se presenta como un buen ejemplo del "buen arte de diseñar", cumpliendo con los estándares profesionales del momento en que fue realizado, y el que transforma la hidrología de una herramienta instrumental a un eje central de la gestión de infraestructuras.

Se destaca que desde el principio se persiguió la identificación del problema de ingeniería y su integración con la planificación territorial, donde se decidió que la hidrología no debía ser un estudio aislado, sino el motor para optimizar un sistema existente de riego y transformarlo en un sistema dual de protección aluvional.

Esta visión estratégica permitió que el diseño no solo buscara evacuar agua, sino integrar soluciones estructurales con el manejo de cuencas, logrando una sinergia económica y técnica que justificaba plenamente la inversión.

Una de las actividades importantes, fue el uso de un vuelo fotogramétrico ortorectificado, el cual no era un procedimiento estándar en los años de la formulación del proyecto (no eran comunes ni estaban disponibles los modelos digitales de elevación con los que se cuentan en la actualidad), con lo que se logró una caracterización exhaustiva de las cuencas y su morfometría, superando la simple medición de áreas para profundizar en parámetros que definen la respuesta física del territorio. Se delimitaron 23 subcuencas utilizando esta cartografía de precisión (escala 1:5.000), lo que garantizó una base sólida para el modelado.

Al calcular variables complejas como la pendiente media ponderada del cauce principal, la densidad de drenaje y el coeficiente de compacidad, se logró representar fielmente la forma real de las cuencas, la cual es predominantemente cóncava y condiciona la velocidad del flujo. La ventaja fundamental de este nivel de detalle es que elimina la "falsa precisión" y permite que los modelos matemáticos operen sobre datos físicos reales, reduciendo drásticamente la incertidumbre en la estimación de los tiempos de respuesta del sistema.

Ante la realidad técnica de encontrarse en un "Escenario III" -caracterizado por la ausencia total de aforos sistemáticos de caudal en la zona-, el proyecto adoptó la metodología de transformación lluvia-escorrentía, construyendo una cadena de supuestos consistente y respaldada por evidencia regional. Por este motivo es que no se utilizaron métodos simplificados, y se optó por el modelo conceptual de la Onda Cinemática (Kinematic Wave) en el software HEC-HMS, lo que constituye un salto cualitativo en la precisión del diseño.

Este método representa los mecanismos físicos del movimiento del agua sobre el suelo y en los colectores, considerando las pérdidas de energía por rugosidad y pendiente, lo que permite que el hidrograma resultante sea hidráulicamente consistente y sirva de interfaz directa para el dimensionamiento de las obras.

La sofisticación en el tratamiento de la amenaza climática es otro punto de excelencia, evidenciado en el uso de la Tormenta de Proyecto Mendoza (TPM) y su optimización espacial mediante isoyetas elípticas. Los trabajos no se limitaron a aplicar una lluvia uniforme, sino que reconocieron la naturaleza convectiva de las tormentas locales, modelando núcleos de alta intensidad con una relación de eje de 1,50.

El haber realizado un análisis de sensibilidad a través de 21 combinaciones de tormentas, moviendo el núcleo por diferentes sectores de la cuenca para encontrar el escenario de máxima carga sobre el Colector de Hidráulica y los trasvases, asegura que la infraestructura proyectada sea robusta ante la variabilidad espacial del clima.

Esta práctica profesional lleva a que el diseño tenga en cuenta el "peor escenario físicamente plausible", evitando fallas por subestimación de aportes locales críticos.

Finalmente, el proyecto transformó los caudales pico en variables de diseño operativas como niveles de agua, velocidades y tirantes, permitiendo verificar si las obras existentes, como el sifón Herrera con capacidad de 200 m³/s, podrían soportar las nuevas solicitaciones tras el trasvase de cuencas.

Esta trazabilidad técnica desde la lluvia hasta la tensión de corte en el bordo del colector es la mayor ventaja del estudio, ya que permitió comunicar claramente a los tomadores de decisión no solo cuánto costaba la obra, sino qué probabilidad de falla se estaba asumiendo bajo un Tiempo de Recurrencia de 75 o 100 años.

5.9 BIBLIOGRAFÍA

Engineers Australia/Geoscience Australia. Australian Rainfall and Runoff (ARR) guideline y documentación sobre patrones temporales y factores areales.

FEMA. Documentación de Flood Risk Analysis and Mapping y referencia a 1-percent-annual-chance flood.

IPCC. Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I, Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate.

Instituto Nacional del Agua. (s. f.). Tormenta de Proyecto Mendoza (TPM). Centro Regional Andino. https://www.ina.va/

ISO. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. Sitio oficial de ISO.

Organización Meteorológica Mundial. (2009). Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP) (WMO-No. 1045). https://library.wmo.int/

U.S. Army Corps of Engineers. (s. f.). HEC-HMS: Hydrologic modeling system. Hydrologic Engineering Center. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration. (1982). Hydrometeorological Report No. 52 (HMR 52): Selection of typical storm forms for PMP [Archivo PDF]. https://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/

USDA/NRCS y USACE. Documentación operativa del método SCS/NRCS Curve Number (TR-55) y tablas CN.

USGS. Bulletin 17C: Guidelines for Determining Flood Flow Frequency (Techniques and Methods, Book 4, Chapter B5).

WMO. Guide to Hydrological Practices (WMO-No. 168), ediciones disponibles en la biblioteca de la Organización Meteorológica Mundial.

6 MODELOS HIDROLÓGICOS EN LOS ANDES CENTRALES DE ARGENTINA Y CHILE

Dr. Ing. Ezequiel Toum[9]

6.1 RESUMEN

Los modelos hidrológicos basados en procesos físicos permiten conocer la dinámica de la oferta hídrica y son además una herramienta indispensable para la gestión del recurso hídrico, ya que brindan los elementos necesarios para conocer y predecir la disponibilidad temporal y espacial del agua. Esta información puede resultar de gran interés en zonas con escasez estructural del recurso, como los Andes Centrales de Argentina y Chile (~30° - 37° S) donde la nieve y los glaciares constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico y proveen un suministro fundamental de agua de deshielo para las actividades antrópicas que allí se desarrollan. En este capítulo se presenta una clasificación de modelos hidrológicos acompañada de una serie de preguntas que sirven como guía práctica al momento de elegir qué modelo utilizar. Luego, se presentan cuatro casos de estudio donde se emplearon diversos modelos de base física para comprender la dinámica nieve, glaciares y escurrimiento. Para finalizar, se discuten vacíos y desafíos para los próximos años: 1) ampliar red de estaciones de alta montaña por encima de los 4000 m s.n.m.; 2) estudiar el rol de la sublimación en el balance de masa hidrológico; 3) liberar y expandir las redes de monitoreo de agua subterránea; 4) desarrollar modelos hidrológicos fundacionales de inteligencia artificial, y 5) brindar cursos de formación para la nueva generación de profesionales en hidrología.

9 Ingeniero Civil, Dr en Ingeniería. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET). Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional (FRM-UTN).

6.2 INTRODUCCIÓN

Los modelos, según Mario Bunge, son sistemas de pensamiento que permiten condensar e integrar conocimientos con el objeto de comprender fenómenos o procesos (sociales, políticos, económicos, físicos, químicos, entre otros). Dicho de otra manera, son una representación esquemática y simplificada de la realidad usada para explicar el mundo que nos rodea, darle sentido y coherencia. Por ello, los modelos se constituyen como parte fundacional e indisoluble del quehacer científico.

En el caso particular de los modelos numéricos, la representación conceptual del sistema bajo estudio (e.g., una cuenca hidrológica) es transformada primero en ecuaciones que explican la dinámica de los fenómenos que componen el sistema (e.g., balance de energía del paquete de nieve), y luego en líneas de código que permiten simular (numéricamente) aquella representación conceptual en una computadora o servidor. Estos modelos requieren datos de entrada (otra simplificación o abstracción de la compleja realidad) que son procesados para dar como resultado una posible realización del sistema (Beven, 2012).

En hidrología, los modelos numéricos son utilizados para predecir (acá se toma la palabra en sentido amplio - i.e., pronosticar, proyectar, explicar) eventos de crecidas, sequías, impactos del cambio climático en la oferta hídrica, recarga de acuíferos, efectos de la deposición de material particulado sobre el manto nival, difusión de un contaminante en el río, entre otros. Esto significa que pueden resultar de gran interés en la planificación y manejo del recurso hídrico (Beven 2008, 2012; Hrachowitz y Clark, 2017). Según su génesis, se pueden agrupar en las siguientes categorías (adaptación propia a la clasificación propuesta por Chow et al., 1988): (a) ***modelos basados sobre procesos***, es decir, aquellos que describen la dinámica de los fenómenos mediante ecuaciones (o simplificaciones) derivadas de la física (e.g., *Cold Regions Hydrological Model* - Pomeroy et al., 2022; HBV - Bergström y Lindström, 2015); (b) ***modelos estadísticos***, que describen relaciones empíricas entre las variables de interés (e.g., equivalente agua nieve máximo y derrame anual del río), asumiendo cierta distribución para los datos de entrada, salida y errores que luego deben verificarse (e.g., homocedasticidad o varianza constante en los errores del modelo de regresión lineal - Brooks et al., 2021); (c) ***modelos de aprendizaje automático*** (o de *machine learning*), que indagan heurísticamente relaciones entre posibles predictores y la(s) variable(s) objetivo con el objeto de predecir o clasificar (e.g., Liu et al., 2022); (d) ***modelos híbridos***, que comprenden aquellas combinaciones entre los de aprendizaje automático y aquellos basados sobre procesos; un caso interesante dentro de este grupo son modelos de asimilación, que usan las ecuaciones de la física en conjunto con modelos matemáticos (e.g., filtros de Kalman, partículas en lote, entre otros) con el objeto de incorporar observaciones o mediciones de las variables de estado (e.g., cobertura nívea, humedad del suelo) para rectificar y por lo tanto mejorar las simulaciones (e.g., MuSA - Alonso-González et al., 2022); (e) ***modelos de inteligencia artificial***, se trata de agentes capaces de asistir en el proceso de modelización (donde como método se podría usar

cualquiera de los anteriores) colaborando con la conceptualización, preparación, ejecución y posterior interpretación de los resultados (e.g., Eythorsson y Clark, 2025).

En las siguientes líneas se abordarán tres casos de modelos basados en procesos físicos y un caso de modelos híbridos. Esta elección se fundamenta en dos razones, primero porque al día de la fecha siguen siendo los modelos de base física los que poseen mayor poder explicativo (Ayala et al., 2023; Harder y Pomeroy 2013; Pomeroy et al. 2016; Sedlar y Hock, 2009), y porque (en opinión de quien escribe) en los próximos años serán los que se apliquen en combinación con modelos de aprendizaje automático y de inteligencia artificial de forma masiva.

Los modelos basados sobre procesos pueden ir desde versiones grilladas de todo el planeta que acoplan el ciclo hidrológico con los intercambios de masa y energía en la atmósfera y océanos, hasta modelos sencillos que discretizan la cuenca como un reservorio único que tiene como datos de entrada precipitación y temperatura dando como resultado sólo el caudal de salida (Addor y Melsen, 2019; Beven 2012). Entre estos dos extremos, se ubica la plétora de opciones existentes, donde las variables ***grado de complejidad de los procesos*** y ***escala espacial*** generan un plano continuo dónde ubicarlos (Cuadro 6.1).

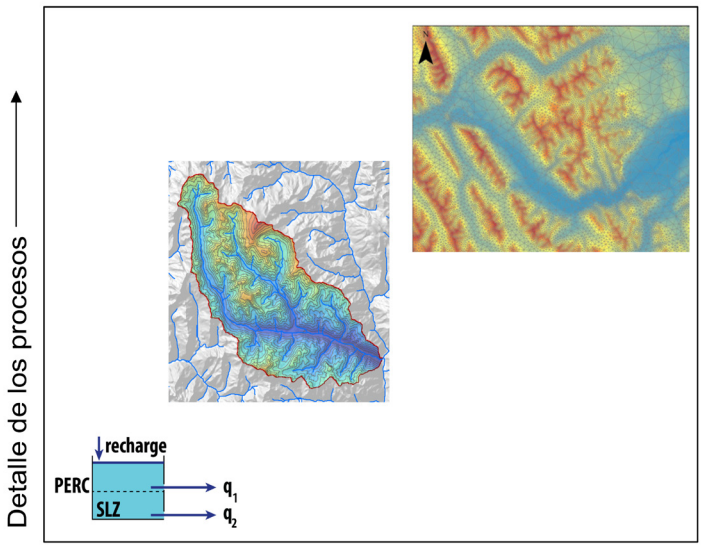
Si bien la mejor forma de asimilar esta temática es mediante la práctica (i.e., usar los modelos), a continuación se describe una posible taxonomía que los clasifica según cinco grandes dimensiones (adaptado de Hrachowitz y Clark, 2017), además cada una de ellas es acompañada de preguntas que pueden orientar al lector en la elección del modelo:

1. ***Resolución espacial***: en un extremo los modelos pueden discretizar la cuenca como un sistema concentrado (i.e., un solo reservorio que representa la cueca como un todo), dividirla según bandas altitudinales homogéneas, agrupar polígonos de acuerdo al tipo de suelo, pendiente, orientación y altitud, ó representar la cuenca como una grilla (ir) regular de elementos. Preguntas guía, ¿a qué escala ocurren los procesos que se intentan caracterizar?¿se tienen los datos necesarios para correr el modelo y evaluar sus simulaciones?¿qué recursos computacionales insume?
2. ***Simplificación del sistema***: aquí la literatura los divide en modelos de base física y conceptuales. Los primeros resuelven las ecuaciones de la mecánica que mejor describen la problemática, mientras que los conceptuales utilizan aproximaciones más bien empíricas. Un ejemplo podría estar relacionado con la evolución del manto nival, donde la primera categoría usaría alguna ecuación de balance de energía, mientras que la segunda aplicaría un modelo índice de temperatura. Desde luego existen matices y por lo tanto grados abstracción para el problema (véase Vionnet et al., 2012 para una discusión sobre modelos de nieve). Preguntas guía, ¿cuál es el objetivo y por lo tanto el grado de detalle que necesito?¿se cuenta con los datos de entrada necesarios?¿cuál es el grado de incertidumbre asociado a la extrapolación espacial y temporal de las mediciones?

3. ***Arquitectura***: los modelos continuos, por un lado, poseen ecuaciones pensadas para resolver procesos a microescala y por lo tanto se aplican en cada uno de los elementos componentes. A modo de ejemplo, el flujo subsuperficial se podría resolver con la ecuaciones de Richard teniendo en cuenta el gradiente espacial de las variables de estado (e.g., contenido de humedad en el suelo). En el otro extremo están aquellos tipo reservorio o conceptuales, donde el almacenamiento y transmisión del agua se produce a gran escala (bandas altitudinales, tipos de suelo) y por lo tanto no se tienen en cuenta los gradientes espaciales entre elementos. Pregunta guía, ¿se cuenta con la información necesaria para evaluar alguna de las variables de estado que simula el modelo?

Cuadro 6.1

Plano continuo para ubicar a los modelos según las variables resolución o escala espacial y el nivel de detalle en la resolución de los procesos físicos que permite simular. Se han colocado tres esquemas de posibles modelos (de izquierda a derecha): uno que conceptualiza la generación de escurrimiento como un solo reservorio con la recarga como dato de entrada y dos salidas de caudal (i.e., resolución espacial baja y poco detalle de los procesos físicos involucrados), el ejemplo de un modelo semidistribuido que discretiza la cuenca en bandas altitudinales y resuelve la evolución del manto nival mediante una aproximación índice de temperatura, y un modelo grillado que resuelve el balance de energía del paquete de nieve mediante un modelo multicapa.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se condensa una serie de criterios para una elección objetiva del modelo o modelos (Beven 2012) que puede ayudar al interesado a no caer en la trampa de selección por "legado" o "costumbre de uso" (Addor y Melsen, 2019),

+ Discutir y listar los procesos físicos de interés en función del problema a resolver.
+ Enumerar los modelos que podrían cumplir con los requisitos del punto anterior, ¿son de código libre y abierto?¿hay que pagar?¿tienen publicaciones científicas asociadas?¿permanece activa la comunidad que los desarrolla?¿están disponibles como software autónomo o son un paquete de un lenguaje de programación?
+ ¿Qué variables simulan los modelos? En función de esta respuesta (para cada modelo) revisitar las preguntas a resolver. Si el interés se centra en pronosticar el caudal medio diario quizás no sea necesario utilizar un modelo grillado de alta resolución, en cambio, si el objetivo es el pronóstico de avalanchas, un modelo espacialmente distribuído y con un gran nivel de detalle en cuanto a los procesos de evolución del manto nival debiera ser el adecuado.
+ Preparar un listado de los supuestos asociados al modelo. Estas simplificaciones deben contrastarse con los procesos físicos que condicionan el problema en cuestión, ¿son razonables dichas simplificaciones?
+ ¿Qué datos de entrada requiere el modelo?¿formato? ¿resolución temporal? ¿qué datos son necesarios para una evaluación rigurosa del modelo? En la propia experiencia de quien escribe, este punto debe ser ponderado de forma especial porque cerca del ochenta por ciento del tiempo dedicado al flujo de trabajo en el proceso de modelización se lo lleva la preparación y evaluación de la calidad de los datos de entrada.
+ Estudiar el formato de salida de las simulaciones así como los recursos y tiempos computacionales que demanda el modelo, ¿se cuenta con las herramientas necesarias para su procesamiento?¿son los tiempos del proyecto compatibles con los recursos y tiempos que insume?

6.3 ZONA DE INTERÉS Y CONTEXTO ACTUAL

En muchas regiones del mundo, las montañas representan las principales fuentes de agua para los ecosistemas naturales, las poblaciones humanas y las actividades socioeconómicas en las áreas circundantes (Viviroli et al., 2011, 2020). Esto es particularmente evidente en la zona central de los Andes de Chile y Argentina (~27°-37°S), región semiárida donde la nieve y los glaciares constituyen componentes cruciales del sistema hidrológico y proveen un suministro fundamental de agua de deshielo para las actividades humanas que allí se desarrollan (Ayala et al., 2020; Caro et al., 2024; Cornwell et al., 2016; Masiokas et al., 2020; Toum et al., 2025). En estas latitudes subtropicales la mayor parte de la precipitación ocurre durante el invierno en conexión a sistemas frontales y ríos atmosféricos que dejan un manto de nieve, que luego se derrite durante los meses más cálidos, siendo la principal componente del escurrimiento en ambas vertientes de la Cordillera (Crespo et al., 2020a, 2020b; Masiokas et al., 2010; Viale y Nuñez, 2010; Toum et al., 2025).

Esta redistribución temporal en la disponibilidad del recurso resulta extremadamente beneficiosa, ya que aporta los mayores volúmenes de agua en primavera y verano, en coincidencia con la época de mayor demanda hídrica (Rivera et al., 2021). Por otra parte, los glaciares de esta región actúan como reservorios de agua que adquieren mayor relevancia durante años o períodos de baja acumulación nívea (Ayala et al., 2020; McCarthy et al., 2022; Caro et al., 2024; Toum et al., 2025). Es decir que un conocimiento acabado de los procesos hidrológicos característicos de las regiones frías resulta fundacional para gestionar de forma inteligente el agua con que cuenta la provincia de Mendoza.

Desde 2010, esta región andina (~27°-37°S) ha experimentado una marcada y persistente disminución en la acumulación de nieve durante el invierno, lo que ha resultado en reducciones notables en los caudales de los ríos y una pérdida generalizada de masa glaciar (Álvarez-Garretón et al., 2021; Ayala et al., 2020; Ferri et al., 2020; Hugonnet et al., 2021; Rivera et al., 2021). Este periodo seco, conocido como la megasequía, se caracteriza por una secuencia deficitaria en la precipitación desde 2010, con valores que oscilan entre un -20% y un -45% por debajo del promedio histórico (1980–2010) según la red de estaciones pluviométricas chilenas (Garreaud et al., 2020). Se la considera la sequía más extrema y prolongada que ha afectado a la región desde comienzos del siglo XX y posiblemente en los últimos mil años (Garreaud et al., 2021, 2020, 2017). Ferri et al. (2020), utilizando información geodésica, estimaron el balance de masa glaciar en los Andes Centrales de Argentina para los subperíodos 2000–2009 y 2009–2018, encontrando balances ligeramente positivos (+0.12 m a.e. a^{-1}) durante el primer subperíodo y valores marcadamente negativos durante la megasequía (–0.21 m a.e. a^{-1}). Tendencias similares se observan en los datos de Braun et al. (2019) y Hugonnet et al. (2021), los cuales reflejan el gran desequilibrio de masa glaciar provocado por la megasequía y sugieren posibles contribuciones significativas del derretimiento glaciar al escurrimiento superficial de los ríos andinos durante este periodo (Ayala et al., 2020; Caro et al., 2024; McCarthy et al., 2022; Toum et al., 2025). Más recientemente la atención se ha centrado en los años híper secos, con déficit pluviométricos de -75% por sobre la media, dentro de los cuales se encuentran los años 2019 y 2021. En estos periodos hay una marcada disminución en los caudales de los ríos, pero aquellos que nacen en cuencas con mayor cobertura glacial sufren una pérdida menor que sus contrapartes en cuencas sin este respaldo (Garreaud et al. 2025).

Todos estos estudios, centrados en la megasequía y en eventos de híper sequía son de gran relevancia tanto en la esfera científica como en la praxis hidrológica ya que las proyecciones de cambio climático para mediados de siglo sugieren condiciones climatológicas de precipitación similares a la megasequía y aumentos en la temperatura, por lo que el periodo iniciado en 2010 resulta de gran relevancia para comprender la dinámica de la oferta hídrica futura (Rivera et al., 2020; Toum et al., 2023).

Bajo este paraguas, el cuerpo restante del capítulo se ha organizado de la siguiente manera: en la sección tres se discuten cuatro casos de estudio recientes que utilizan modelos numéricos basados sobre procesos físicos de complejidad variable para lograr

una mejor comprensión sobre la dinámica que regula la generación de escurrimiento en la zona de interés. Luego, en la sección cuatro, se plantean desafíos futuros que intentan conectar aplicaciones prácticas con el quehacer científico.

6.4 CASOS DE ESTUDIO

En pleno siglo XXI y posiblemente sumergidos en una cuarta revolución científico-tecnológica, existe una creciente cantidad de información susceptible de ser incorporada en estudios hidrológicos y toma de decisiones (Donoho 2017; Hutton et al., 2016; Slater et al., 2019; Szalay y Gray, 2006), por lo que resulta fundamental que estas últimas estén construidas sobre evidencia científica. Bajo esta visión y considerando la zona hidroclimática en que se encuentran las cuencas cabeceras de los principales ríos de la provincia de Mendoza, es que se han seleccionado cuatro casos de estudio. Aquí sólo se presentan algunos aspectos relacionados con la línea narrativa del capítulo, por lo que se recomienda al lector consultar los artículos originales para más detalles.

6.4.1 Dinámica nivo-glaciar en la cuenca del río Mendoza (~33° S), Argentina (Toum et al., 2025)

Zona de estudio y objetivos

A pesar de la crucial importancia que los recursos hídricos tienen en los Andes de Mendoza, existen muy pocos estudios focalizados en comprender la dinámica nival, glaciar y su relación en la generación del escurrimiento. El presente trabajo aborda esta problemática y se enfoca en la compresión los procesos de almacenamiento y liberación de agua contenida el manto nival y en los glaciares con el consecuente impacto en la disponibilidad estacional e interanual de agua en el río Mendoza durante el periodo 1981-2019 (Cuadro 6.2). Para ello se utilizó el modelo hidrológico HBV.IANIGLA (Toum et al., 2021).

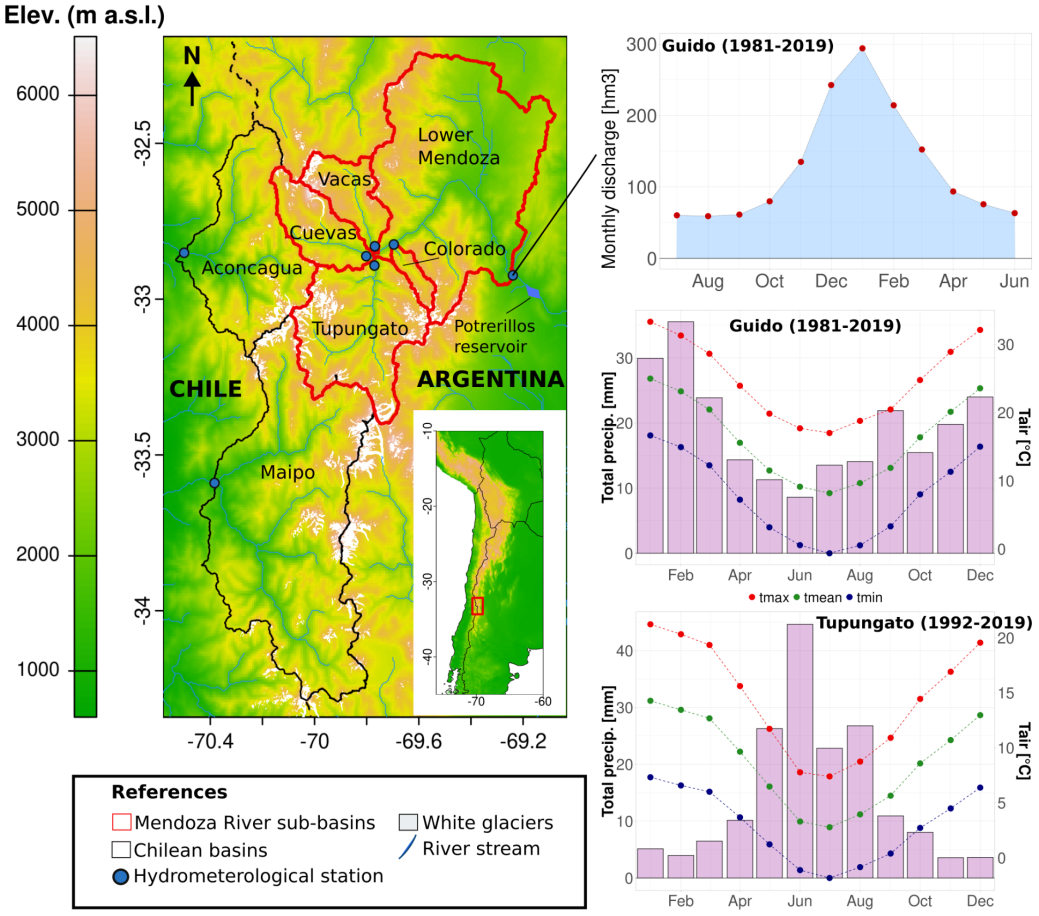
Los objetivos principales de este estudio fueron: 1) modelizar y cuantificar la importancia relativa del aporte glaciar al caudal del río Mendoza durante las últimas cuatro décadas (1981-2019); y 2) evaluar la relación que existe entre el aporte glaciar y la variabilidad estacional e interanual de la acumulación de nieve en los Andes, utilizando registros de caudales observados y la asociación estadística entre ellos.

Descripción del modelo y datos de entrada

El balance hídrico superficial de la cuenca del río Mendoza (Cuadro 6.2) se simuló con el modelo HBV.IANIGLA (Toum et al., 2021). Esta es una versión modificada del modelo HBV original (Bergström, 1991; Bergström y Lindström, 2015; Lindström et al., 1997) que incorpora rutinas específicas para simular el balance de masa glaciar y contabilizar el aporte de agua proveniente de la fusión de nieve y hielo al caudal de la cuenca.

Cuadro 6.2

Mapa que muestra la porción andina de la cuenca del río Mendoza junto con las subcuencas consideradas en este estudio (polígonos rojos). También se indican las cuencas superiores chilenas de los ríos Aconcagua y Maipo (polígono negro). Los gráficos de la derecha muestran los climogramas de la distribución media mensual del caudal para la estación de aforo Guido, la temperatura media mensual del aire (para registros diarios de máxima, media y mínima) y la precipitación total para las estaciones Guido y Tupungato.



Fuente: elaboración propia.

El modelo en cuestión opera en el lenguaje R (R Core Team, 2024) y discretiza la cuenca de estudio en bandas altitudinales (Cuadro 6.3). Para este trabajo en particular, cada (sub)cuenca se discretizó utilizando bandas de elevación de 200 m.

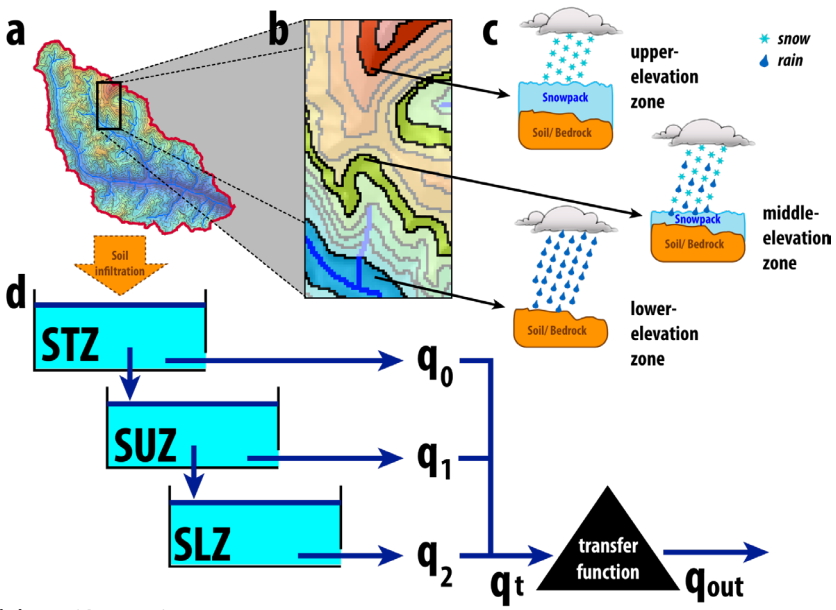
Como datos de entrada, el modelo requiere series temporales diarias y completas de temperatura media del aire, precipitación total diaria y evapotranspiración potencial. También se necesita la superficie glaciar en la cuenca de estudio. Las áreas de hielo limpio

y cubierto de detritos se agrupan por separado en cada banda altitudinal, ya que se les asigna un factor de fusión diferente. Con estos datos, el modelo calcula la precipitación total promedio para cada banda altitudinal y luego divide este valor en nieve y lluvia utilizando un único umbral de temperatura (Cuadro 6.3).

Luego, simula los procesos de acumulación y fusión de nieve (y glaciares) modelo índice de temperatura mediante. Este enfoque se consideró apropiado dada la falta de datos meteorológicos fiables y extensos en el área de estudio (se han utilizado soluciones similares en otras cadenas montañosas con escasez de datos, por ejemplo, Ali et al., 2018; Ayala et al., 2020; Burger et al., 2019; Konz et al., 2010; Ragettli et al., 2012). La evapotranspiración e infiltración diarias se simulan en la rutina de suelo y, en pasos posteriores, el agua infiltrada pasa a la rutina de reservorio a través de una aproximación que emula el efecto de almacenamiento a escala de cuenca. Finalmente, el agua es transportada hacia el punto de salida de la cuenca, dando como resultado el caudal medio diario (Cuadro 6.3).

Cuadro 6.3

Ejemplo del acoplamiento modular en el modelo para una cuenca de montaña. Para simular la acumulación y fusión de nieve, la cuenca se discretiza en bandas altitudinales (a, b). Cada uno de estos polígonos contiene un módulo de nieve y otro de suelo (c), luego, la infiltración efectiva del suelo se pondera en función del área relativa del polígono con respecto a la de la cuenca y pasa a los reservorios (d). Finalmente, el ajuste temporal entre el caudal simulado y el observado se calibra utilizando una función de transferencia triangular. SLZ, almacenamiento de la zona inferior; SUZ, almacenamiento de la zona intermedia; STZ, almacenamiento de la zona superior.



Fuente: elaboración propia.

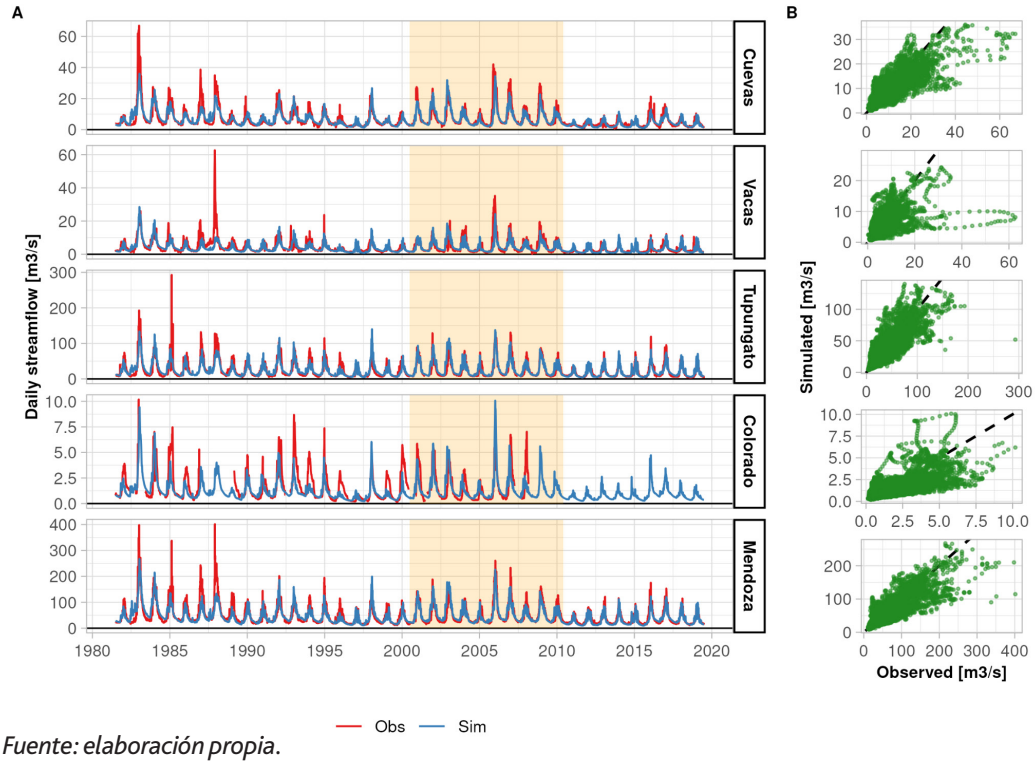
Resultados

El Cuadro 6.4 muestra los registros de caudal diario simulado y observado de todos los ríos entre 1981 y 2019 (año hidrológico: 1 de julio - 30 de junio). Las series modeladas muestran una buena concordancia con los registros observados y reproducen la gran variabilidad estacional de estos ríos. Las mayores discrepancias se concentran principalmente a mediados de la década de 1980, con diferencias comparativamente mayores durante las temporadas cálidas de 1982/83, 1984/85, 1986/87 y 1987/88 (Cuadro 6.4-A).

Los balances de masa se agregaron y analizaron por separado para cada subcuenca. Los valores simulados del balance de masa glaciar total fueron: +660 mm e.a. (2001-2008) y -2404 mm e.a. (2009-2017) en la cuenca del Cuevas, +103 mm e.a. y -2033 mm e.a. en la cuenca del Vacas, +980 mm e.a. y -2285 mm en la cuenca del Tupungato, +588 mm e.a. y -161 mm e.a. en la cuenca del Colorado, y +340 mm e.a. y -784 mm e.a. en la cuenca del río Mendoza Inferior. Estos resultados indican un balance de masa glaciar ligeramente positivo durante el primer período, seguido de una pérdida de masa neta

Cuadro 6.4

(A) Series temporales del caudal diario simulado (azul) y observado (rojo) para las cuencas analizadas durante el período 1981/1982–2018/2019 (38 años hidrológicos). El rectángulo naranja indica el período utilizado para la calibración del modelo. (B) Gráficos de dispersión de los caudales diarios observados versus los simulados. La línea de trazos negra representa la línea 1:1.

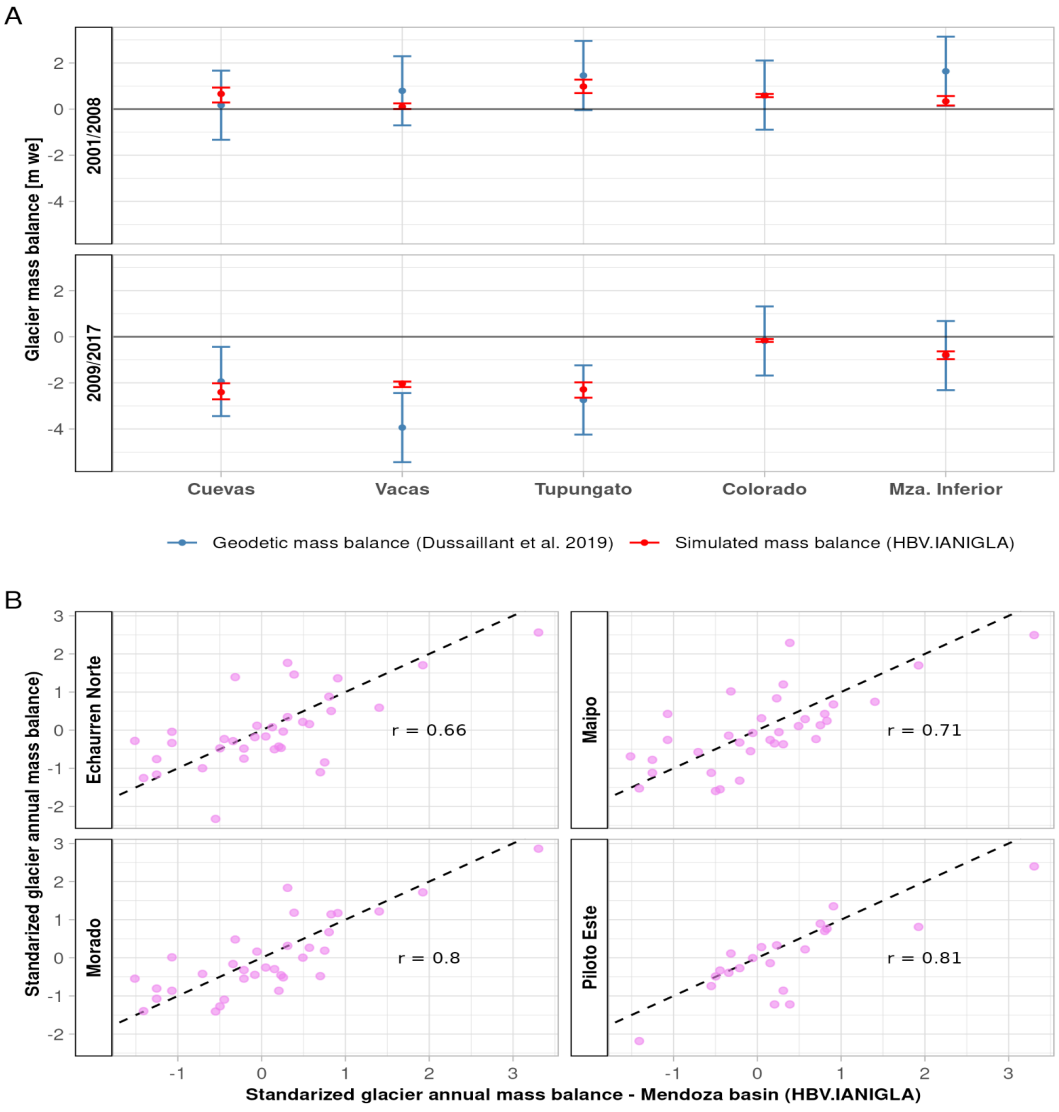


Fuente: elaboración propia.

significativa durante la *megasequía*. Esta tendencia concuerda con estudios previos de Dussaillant et al. (2019), Braun et al. (2019) y Hugonnet et al. (2021). Con la excepción del período 2009–2017 en la subcuenca del río Vacas, todos los resultados modelados se encuentran dentro de las estimaciones de incertidumbre geodésica (Cuadro 6.5).

Cuadro 6.5

Comparación entre los balances de masa glaciares geodésicos obtenidos por Dussaillant et al. (2019) para los subperíodos 2001/2008 y 2009/2017 (barras azules), y los derivados de las simulaciones de balance de masa glaciar del modelo HBV.IANIGLA (barras rojas). Las estimaciones geodésicas muestran los valores medios para cada subcuenca, ± 1.5 m e.a. (equivalente en agua). Los valores simulados incluyen el promedio y los percentiles 5 %–95 %.



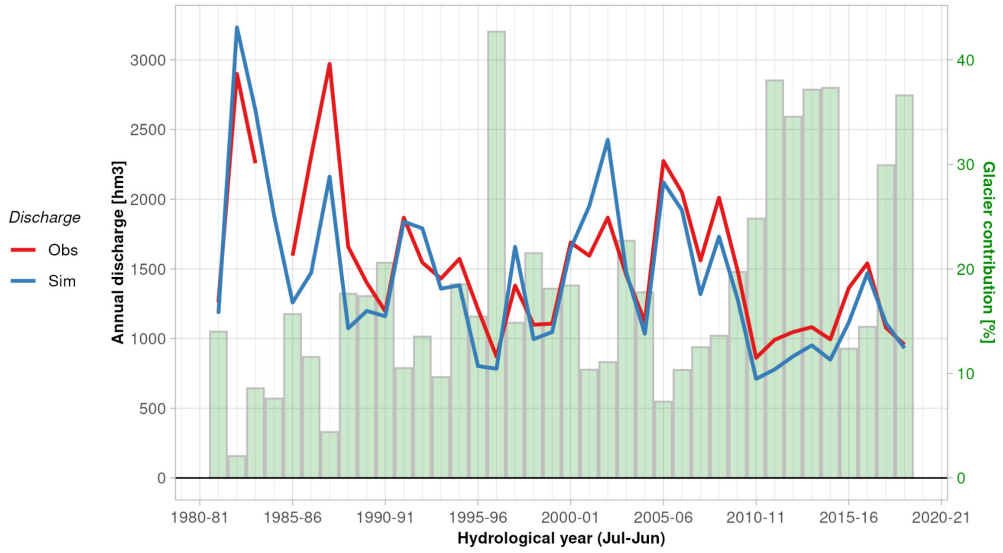
Fuente: elaboración propia.

Las simulaciones indican que, en promedio, los glaciares han aportado ~18% del derrame anual registrado en la estación Guido entre 1981 y 2019 (Cuadro 6.6). La proporción más baja se estimó para el año hidrológico 1982-83, cuando los glaciares contribuyeron sólo con el 2% del derrame. En contraste, el valor más alto se obtuvo para 1996-97, cuando el componente glaciar aumentó a ~43%. La serie del aporte glaciar presenta una alta variabilidad interanual (coeficiente de variación del 56%) y una tendencia positiva y significativa desde principios de la década de 1980.

Este patrón sugiere un rol hidrológico cada vez más relevante de los glaciares en la cuenca del Mendoza, fenómeno posiblemente asociado a la pérdida de masa de hielo generalizada reportada en esta región andina (Masiokas et al., 2016; Leiva et al., 2007; Farías-Barahona et al., 2020; Ferri et al., 2020; Ayala et al., 2020; Hugonnet et al., 2021). De hecho, al comparar el período de la *megasequía* (2010-2019) con los años hidrológicos precedentes (1981-2009), el aporte glaciar promedio a la cuenca del río Mendoza casi se duplicó, pasando de ~15% a ~30%, resaltando el efecto amortiguador de estos cuerpos de hielo bajo condiciones de sequía y mostrando también el gran volumen de hielo perdido durante la última década (Dussaillant et al., 2019; Huggonet et al., 2021).

Cuadro 6.6

Comparación entre los caudales anuales totales observados (línea roja) y simulados (línea azul) para el río Mendoza en la estación de aforos Guido. Los valores anuales se calcularon utilizando el año hidrológico julio–junio. Los aportes glaciares simulados por el modelo HBV.IANIGLA se indican con las barras verdes.



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

a. Desde 1981-82 hasta 2018-19 (38 años), los glaciares han aportado en promedio ~18% al escurrimiento anual del río Mendoza (aproximadamente 276 hm³ anuales). Este valor, que equivale al 70% de la capacidad máxima del embalse Potrerillos (395 hm³ según la última batimetría), indica que los glaciares son una parte importante del ciclo hidrológico del río Mendoza y que proveen agua todos los años, con un mínimo estimado del 2% para el año 1982-83 y un máximo que alcanzó ~40% del escurrimiento anual para el año 1996-97.

b. La serie de aporte por escurrimiento glaciar presenta un alto coeficiente de variación (~56%) y una tendencia positiva y significativa desde finales de la década de 1980, una evidencia de que los glaciares están en desequilibrio con las condiciones climáticas actuales, con la consecuente disminución del volumen glaciar disponible. Al comparar el período de la *megasequía* (2010-2019) con los años hidrológicos precedentes (1981-2009), el aporte glaciar promedio a la cuenca del río Mendoza casi se duplicó, pasando de ~15% a ~30%, lo que resalta el efecto amortiguador de los glaciares en condiciones de sequía y también el masivo volumen de hielo perdido durante la última década.

c. Cuando los años hidrológicos se agrupan en clases secas, normales y húmedas, se resalta el rol de los glaciares como elementos amortiguadores del ciclo hidrológico en años con nevadas muy por debajo del promedio, aportando agua que en promedio supera el 30% del caudal anual durante los años secos. Este efecto tiene un impacto directo en la distribución temporal del caudal del río, donde en los años secos el orden relativo de los meses de mayor caudal cambia, pasando de la tríada enero-diciembre-febrero a la de enero-febrero-marzo, modificando así el momento en que los mayores volúmenes de agua están disponibles durante la temporada de verano.

6.4.2 Variaciones del escurrimiento glaciar en la cuenca del río Maipo (~33.5° S), Chile (Ayala et al., 2020)

Zona de estudio y objetivos

La cuenca del río Maipo con punto de cierre en la estación de aforos el Manzano es la principal fuente de agua para la ciudad de Santiago de Chile (~70% del agua para consumo humano). Posee un área de 4843 km², su rango altitudinal va de los 850 a los 6570 m s.n.m. y posee más de 800 cuerpos glaciares que cubren una superficie cercana a los 378 km² (~8% de la cuenca - Cuadro 6.7).

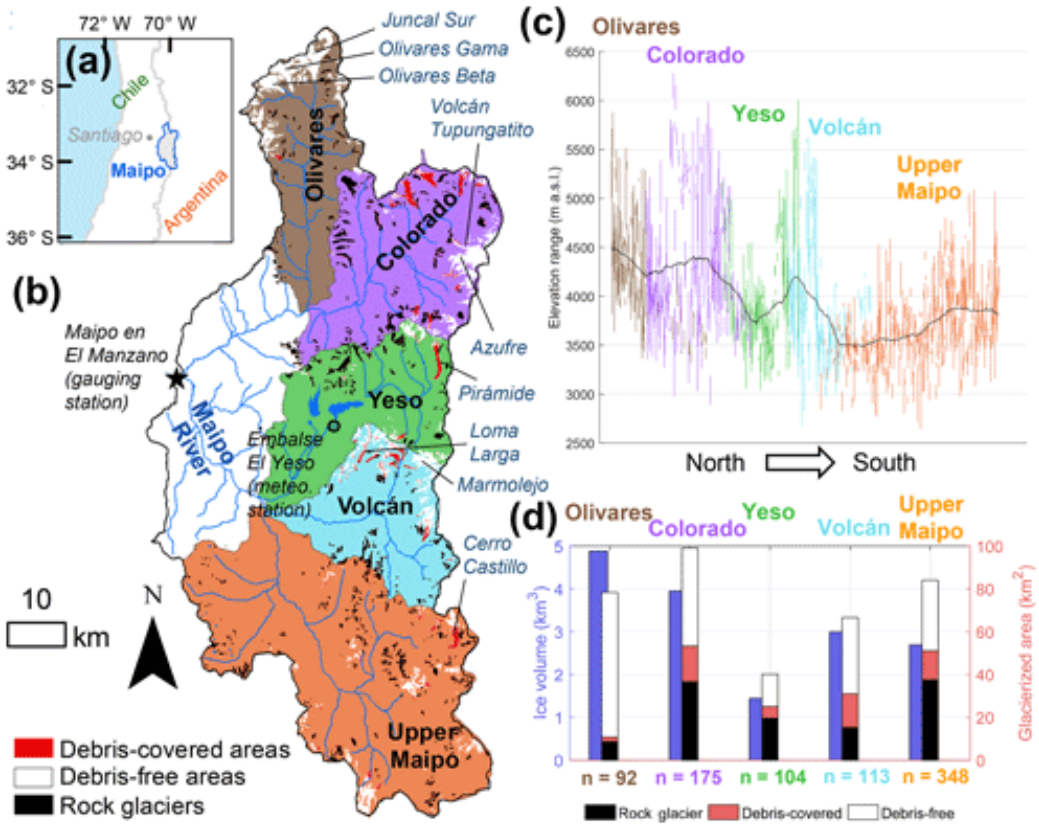
Los objetivos de este trabajo fueron: 1) reconstruir el área y volúmen glaciar desde 1955 a 2015; 2) analizar el rol de los glaciares en el ciclo hidrológico de la cuenca y sus subcuencas; y 3) identificar las tendencias del escurrimiento glaciar. Para ello los autores utilizaron el modelo hidroglaciológico TOPKAPI-ETH (Fatichi et al., 2014; Ragettli et al., 2014).

Descripción del modelo y datos de entrada

TOPKAPI-ETH es una versión del modelo original (*Topographic Kinematic Approximation and Integration* - Ciarapica and Todini, 2002) que permite simular la evolución del manto nival y del balance de masa glaciar mediante un modelo índice de temperatura que adiciona la radiación de onda corta al cálculo de la fusión nivoglaciar (Fatichi et al., 2014; Ragettli et al., 2014). Discretiza la cuenca en una grilla regular, por lo que sus simulaciones (y datos de entrada) son espacialmente distribuídos y puede correr en pasos de tiempo horarios y diarios (este trabajo). Como datos de entrada requiere series de precipitación total, temperatura del aire y transmisividad de la radiación solar. Además, para el ejercicio de modelización en cuestión se necesitó el modelo digital de elevación de la cuenca, los polígonos con las zonas cubiertas por hielo y su espesor inicial, así como los tipos de suelo.

Cuadro 6.7

(a y b) Mapa con la cuenca y subcuencas del río Maipo con punto de cierre en la estación de aforos el Manzano. (c) Perfil latitudinal de la elevación de la cuenca y (d) cantidad, área y volumen de hielo estimados en las distintas subcuencas del río.

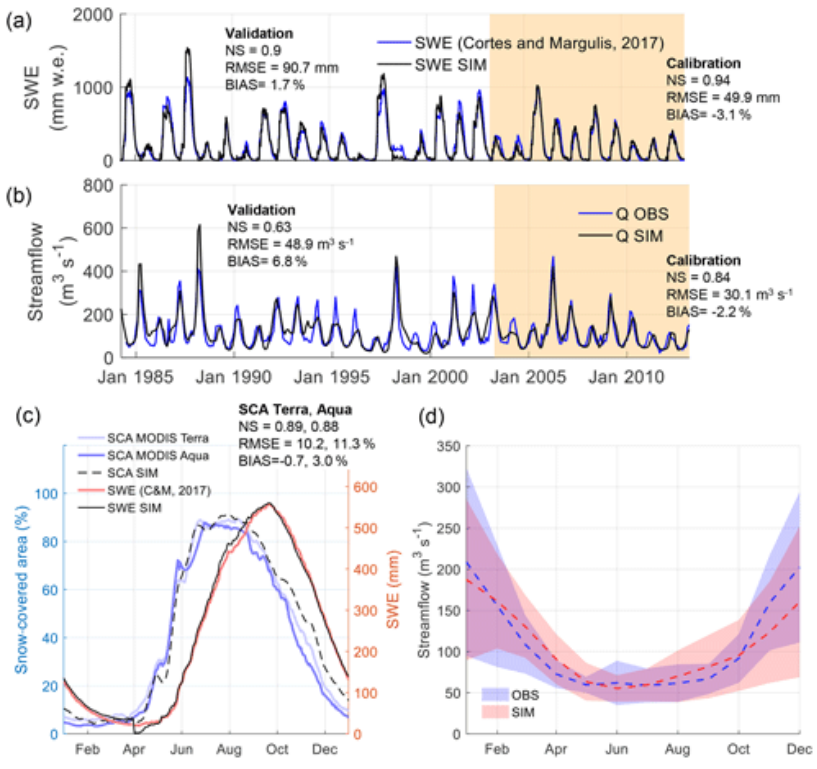


Fuente: Ayala et al. (2020).

Tanto precipitación total como temperatura media diaria fueron extraídos del CR2MET (CR2, http://www.cr2.cl, último acceso: 19 de agosto 2019), producto grillado con paso de tiempo diario desarrollado para Chile continental sobre la base del reanálisis ERA-Interim y del producto temperatura de superficie de MODIS. El mismo posee una resolución espacial de 0.05°, está disponible desde 1979 y fue reescalado a la grilla del modelo numérico (100 m y 1 km) mediante interpolación lineal de los gradientes observados. Por su parte, la transmisividad nubosa se obtuvo de la base de datos de radiación solar chilena (http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/, último acceso: 19 de agosto 2019) para el periodo 2004-2016. Para extender hacia 1955 estas tres series, los autores se valieron de los registros de las estaciones el Yeso y Quinta Normal.

Cuadro 6.8

Resultados del modelo TOPKAPI-ETH, cuenca del río Maipo. (a) EAN simulado comparado con los resultados de Cortés y Margulis (2017). (b) Caudal mensual simulado y observado en la salida de la cuenca. En (a) y (b) el área naranja indica el período de calibración. (c) Variabilidad estacional promedio del SCA (Área Cubierta de Nieve) simulado, observado por MODIS y del EAN de Cortés y Margulis (2017) en el período de calibración. (d) Variabilidad estacional promedio del caudal simulado y observado en el período de calibración. Las áreas coloreadas en (d) corresponden a las desviaciones estándar observadas y simuladas de la variabilidad interanual.



Fuente: Ayala et al. (2020).

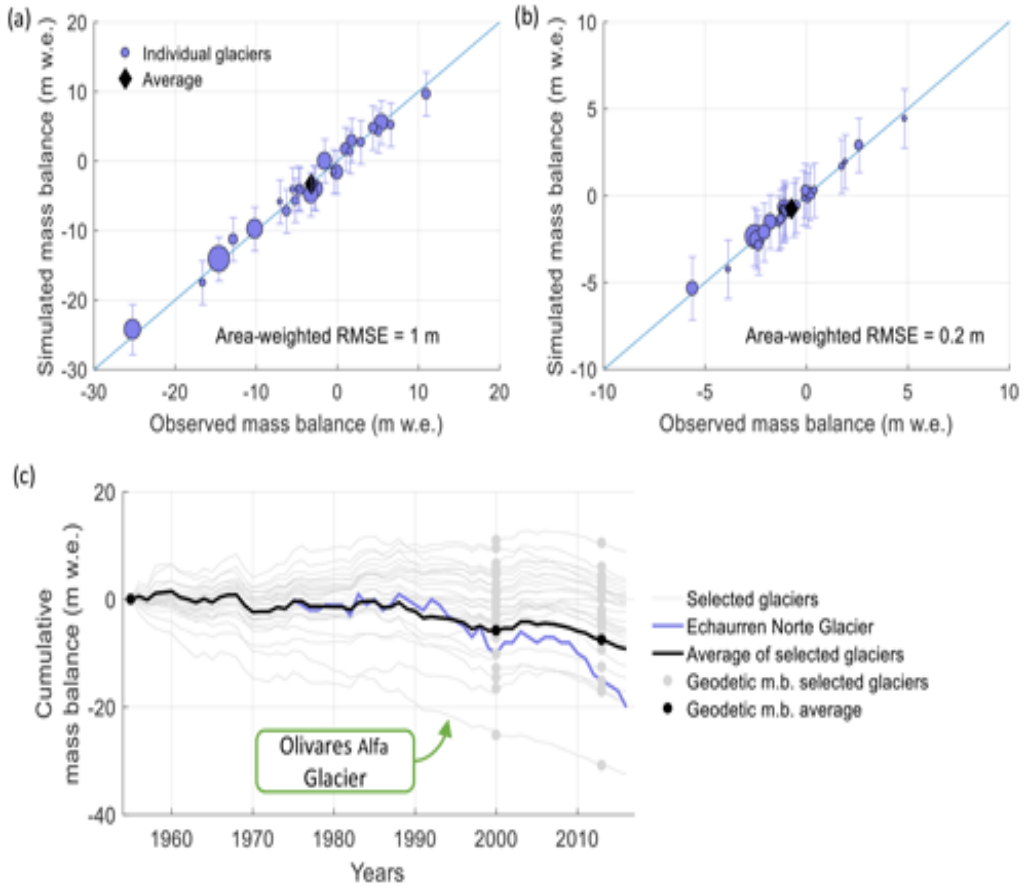
Para calibrar y evaluar las simulaciones, se usaron las series de cobertura nívea provenientes de MODIS, las series de caudal de la estación de aforos el Manzano, las de equivalente agua nieve (EAN) para toda la cuenca (Cortés y Margulis, 2017) y estimaciones propias de cambios de espesor glaciar mediante técnicas geodésicas. (ver Cuadro 6.8).

Resultados

Los valores de EAN simulados mostraron buena correspondencia tanto en periodo de calibración como de validación con las series de referencia (Cuadro 6.8-a). El error cuadrático medio fue de 50 mm a.e. durante la calibración y de 90 mm a.e. durante la validación, con diferencias importantes en los máximos anuales durante dos años de la década de

Cuadro 6.9

(a y b) Comparación entre los balances de masa glaciar observados y simulados (periodos de calibración y validación). (c) Evolución del balance de masa acumulado para cada glaciar de la cuenca, donde los puntos indican los datos observacionales y las líneas representan las simulaciones.



Fuente: Ayala et al. (2020).

1980. Dichas discrepancias se trasladan al hidrograma, donde el desempeño del modelo fue aceptable (Cuadro 6.8-b). Como sugieren las Cuadro 6.8-c y d, el ciclo anual tanto de EAN, cobertura nival y derrame son simulados de forma aceptable.

Por su parte, el balance de masa glaciar simulado para los 26 cuerpos de hielo con datos fue satisfactorio tanto para el periodo 1955-2000 como para el 2000-2013, con errores cuadráticos medios de 1 y 0.2 m a.e. respectivamente, valores que son inferiores al rango de incertidumbre del método geodésico para calcular los cambios de elevación de los cuerpos de hielo (Cuadro 6.9- a y b). La señal del balance de masa acumulado sigue un patrón similar para todos los glaciares seleccionados, donde destaca el fuerte retroceso de Olivares Alfa, uno de los cuerpos con mayor tasa de derretimiento de la zona (Cuadro 6.9-c).

Según las simulaciones, el aporte glaciar promedio durante 1955-2016 fue ~15%, mientras que la fusión nival se rondó ~55% y la lluvia ~30%. Si se considera sólo el periodo estival, los porcentajes relativos fueron ~60%, ~23% y ~17% respectivamente (Cuadro 6.10).

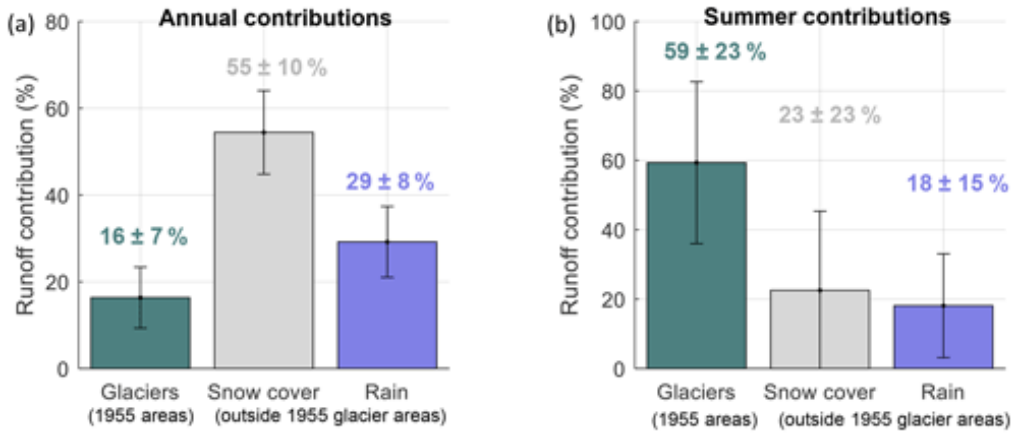
Conclusiones

a. Durante el periodo 1955-2016 el volumen de hielo en la cuenca del Maipo ha disminuido en un 20%. Esto es consistente con otros estudios que muestran un decremento generalizado en los balances de masa glaciar de la zona, indicando además un desequilibrio con las condiciones climáticas imperantes.

b. Los glaciares han contribuido en promedio con ~15% del derrame anual del río, con una gran variabilidad interanual asociada a la disponibilidad de nevadas.

Cuadro 6.10

Contribución al derrame anual de las componentes glaciar, nival y pluvial al derrame anual (a) y estival (b).



Fuente: Ayala et al. (2020).

c. El pico de aporte glaciar ocurrió durante 1968-1969, cuando alcanzó cerca del 50% del derrame anual. A partir de ese momento, y como consecuencia de la pérdida de volumen, los picos de aporte durante años con pocas nevadas han ido en decremento.

6.4.3 El rol de la sublimación en la disponibilidad espacial de nieve para la generación de escurrimiento en la cuenca Corrales, Chile (~30.1° S - Ayala et al., 2023)

Zona de estudio y objetivos

La cuenca Corrales (30.16°S; 68.88°O), está localizada en la zona alta de los Andes semiáridos de Chile (180 km al este de La Serena), posee un rango altitudinal que se extiende desde los 3800 a los 5600 m s.n.m. (la mitad de la cuenca está por encima de los 4700 m s.n.m.) y cubre una superficie de 79 km² (Cuadro 6.11). En esta zona, donde la fusión nival es la principal fuente de agua (Favier et al., 2009), entre el 50% y 80% de la nieve estacional se pierde por sublimación (Réveillet et al., 2020) por lo que identificar zonas generadoras de escurrimiento (i.e., lugares que por sus características permitan la acumulación y permanencia de la nieve estacional para su posterior derretimiento) resulta de vital importancia. En esta línea, los objetivos específicos fueron: 1) cuantificar las componentes del balance de masa nival; 2) determinar la distribución espacial del escurrimiento debido a la fusión nival e identificar las zonas de mayor aporte; y 3) caracterizar los principales rasgos de dichas áreas.

Descripción del modelo y datos de entrada

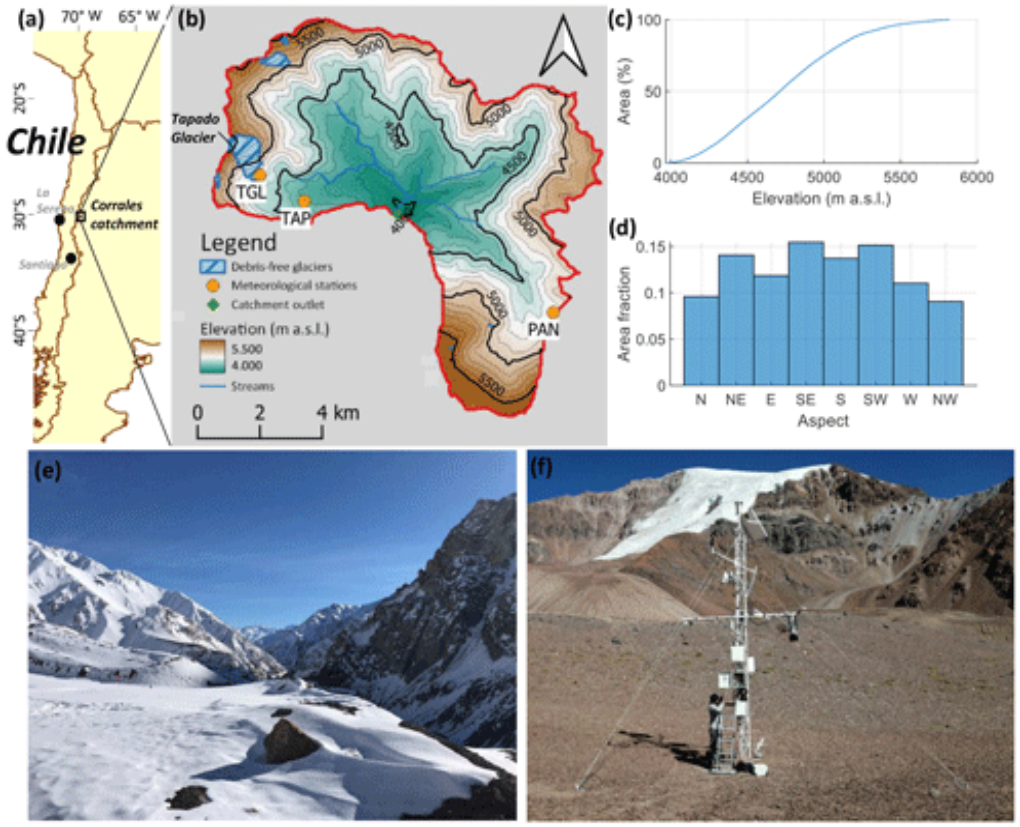
Con el objeto de simular la evolución del paquete de nieve en toda la cuenca, se utilizó el modelo de base física *SnowModel* (Liston y Elder, 2006a). El mismo está compuesto de cuatro módulos que resuelven respectivamente: la distribución espacial de los registros provenientes de estaciones meteorológicas (*MircoMet*; Liston y Elder, 2006b), el balance de energía superficial del paquete (*EnBal*; Liston, 1995) e interno (*SnowPack*; Liston y Hall, 1995), y por una rutina que resuelve el transporte de nieve debido al viento y su correspondiente sublimación (*Snow-Tran3D*; Liston et al., 1998).

El modelo se corrió con un paso de tiempo de tres horas desde abril de 2019 a marzo de 2021 sobre un modelo digital de elevación con 30 m de resolución. Además se utilizaron los parámetros por defecto, por lo que no hubo que realizar calibración.

Además del modelo digital de elevación, se requieren series (paso de tres horas) de precipitación total, temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, radiación de onda corta y larga incidentes, y presión atmosférica. Éstas provienen de las estaciones meteorológicas automáticas Tapado, Glaciar Tapado y Paso Agua Negra (más detalles en Ayala et al., 2023).

Cuadro 6.11

(a) Ubicación de la cuenca de Corrales en Chile, (b) mapa de la cuenca de Corrales que incluye las estaciones meteorológicas Tapado (TAP), Glaciar Tapado (TGL) y Paso Agua Negra (PAN), (c) hipsometría de la cuenca, (d) distribución de frecuencia de la exposición de la pendiente en la cuenca, (e) acumulación de nieve invernal cerca del embalse La Laguna (~3200 m s. n. m.; Foto: del autor principal del artículo, 17 de junio de 2020), y (f) estaciones meteorológicas automáticas Tapado con el glaciar homónimo de fondo (Foto: Cristian Orrego, 22 de noviembre de 2010).



Fuente: Ayala et al. (2020).

Para la validación de los resultados, los investigadores se valieron de tres productos espaciales relacionados con la nieve: mapas basados sobre imágenes satelitales con índices de ausencia y persistencia nívea (Wayand et al., 2018), mapas de EAN modelizados para todos los Andes extratropicales (27°-37° S) por Cortés y Margulis (2017), e imágenes de cobertura nívea derivados de Sentinel-2.

Resultados

A escala puntual, los valores de altura del paquete y de su contenido de agua simulados poseen una correspondencia aceptable respecto a las mediciones (Cuadro 6.12). Tanto

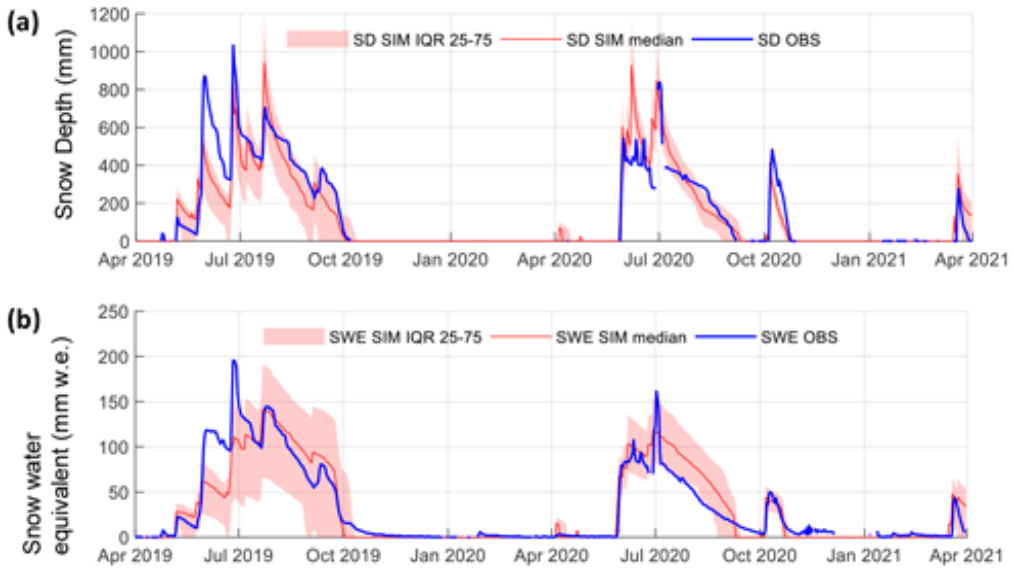
los eventos de precipitación como las caídas abruptas posteriores están bien simuladas aunque existen algunas diferencias en los valores absolutos.

Por otro lado, al comparar las simulaciones de *SnowModel* con los productos de nieve seleccionados, los autores encontraron que las simulaciones reproducen correctamente los principales patrones espaciales de la cobertura nival a lo largo del año, pero tienden a sobreestimar el área de cobertura invernal y a suavizar la variabilidad espacial de la nieve durante el verano.

Respecto a la distribución espacial de la generación de escurrimiento, los investigadores graficaron el porcentaje acumulado de escurrimiento nival en función del área acumulada (Cuadro 6.13). Encontraron que ~50% del escurrimiento nival se genera en el 21% a 29 % del área de la cuenca (Cuadro 6.13-a), a los que denominaron como puntos *nodales o calientes* de escurrimiento nival (Cuadro 6.13-b). De las simulaciones, derivaron que ~50 % de la cuenca produce ~80% del escurrimiento nival total (Cuadro 6.13-b), siendo esta heterogeneidad mayor que la del máximo anual de EAN (max. SWE) e indicio de que la remoción de nieve por transporte eólico y sublimación (entre el 70% y 90% de la nieve estacional) aumenta aún más la variabilidad espacial en el escurrimiento nival resultante.

Cuadro 6.12

Series temporales de las variables de nieve observadas en la estación Tapado y de las corridas en lote para la celda de la grilla correspondiente. (a) Profundidad de la nieve y (b) Equivalente en Agua de la Nieve (SWE por sus siglas en inglés). Las líneas y áreas rojas representan los valores de la mediana y los rangos intercuartílicos de las corridas del ensamble de SnowModel, respectivamente. Las líneas azules corresponden a las observaciones.



Fuente: Ayala et al. (2020).

Conclusiones

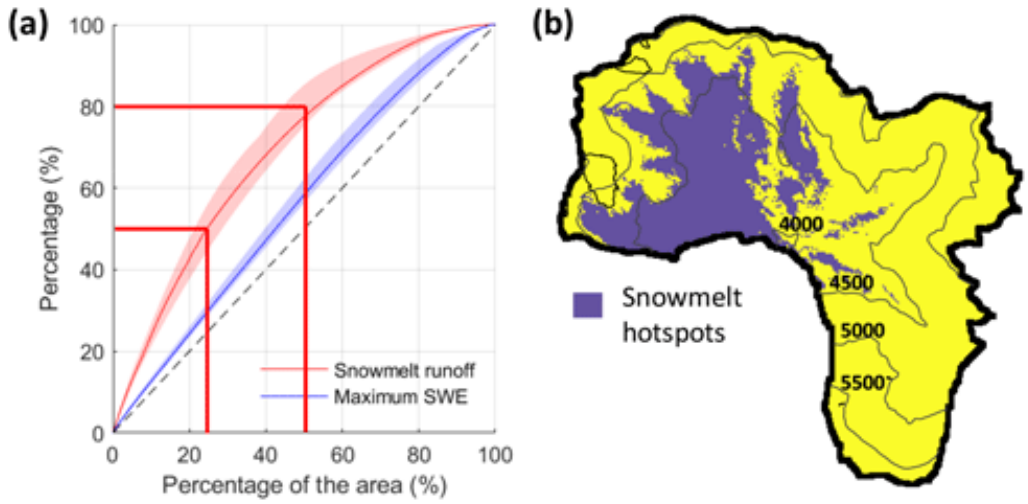
a. La sublimación del manto nival es la componente dominante de la ablación total (fusión más sublimación) del paquete en toda la cuenca bajo estudio, representando entre el 70% y el 90%. En invierno y después de las nevadas, la sublimación de la nieve transportada por el viento es relevante y domina en áreas expuestas en la zona oriental de la cuenca.

b. Según las simulaciones, ~50% del escurrimiento nival es producido por entre el 20% y 29% del área de la cuenca, zonas definidas como *puntos nodales* de escurrimiento nival. Como en cualquier terreno de montaña, la gran heterogeneidad espacial del escurrimiento nival es consecuencia de patrones complejos asociados a la gran variabilidad en los forzantes energéticos que la topografía impone, sin embargo, en ambientes además áridos, dicha heterogeneidad se ve apalancada por las altas tasas de sublimación, que reducen la nieve disponible para la fusión en sitios expuestos al viento.

c. En la cuenca bajo estudio, los puntos nodales de escurrimiento se encuentran principalmente entre los 4200 y 4800 m s.n.m. y tienen orientación este, baja pendiente y gran acumulación nívea.

Cuadro 6.13

(a) Escurrimiento nival acumulado y equivalente de agua en nieve máximo simulados en función del área acumulada de la cuenca y (b) mapa de los puntos nodales de escurrimiento nival. En el (a), las líneas y áreas rojas representan los valores de la mediana y el rango intercuartílico (percentiles 25 y 75) de las corridas del ensamble de SnowModel, respectivamente.



Fuente: Ayala et al. (2020).

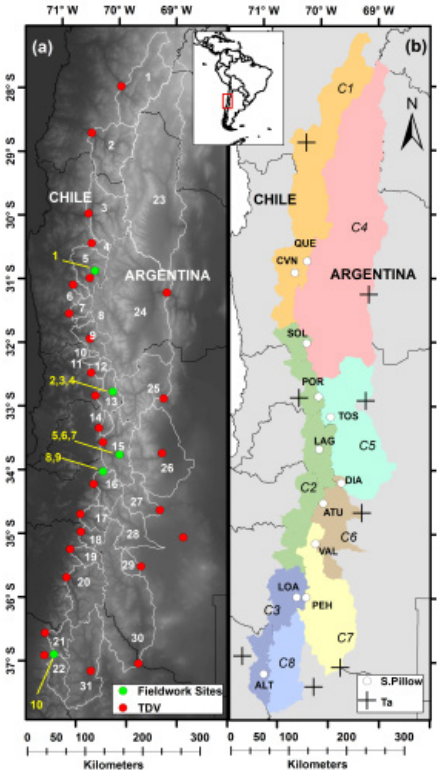
6.4.4 Variabilidad espacio-temporal del equivalente agua nieve en los Andes extratropicales (27° - 38° S - Cornwell et al. 2016)

Zona de estudio y objetivos

Los Andes extratropicales son una barrera orográfica con una altura promedio de 5 km que atrapa la humedad que acarrean los vientos del oeste, almacenando agua en forma de nieve durante el invierno y liberándola a medida que suben las temperaturas durante el verano (Cuadro 6.14). Esta cadena montañosa provee agua ~75% de la población de Chile y al ~7% de Argentina, por lo que el estudio de la variabilidad espacial y temporal del contenido de agua en el manto nival resulta de fundamental importancia. En este trabajo se plantearon dos objetivos: 1) analizar los patrones dominantes de la variabilidad espacio temporal del equivalente en agua de la nieve (EAN); y (2) evaluar las fortalezas y debilidades del método de reconstrucción de EAN en diferentes subregiones de los Andes extratropicales.

Cuadro 6.14

(a) Modelo digital de elevación con transectas nivométricas (puntos verdes) y estaciones de aforo de ríos (puntos rojos). (b) Polígonos que agrupan cuencas hidrológicas con variabilidad interanual común según el hidrograma y estaciones nivométricas (colchones de nieve - puntos blancos).



Fuente: Cornwell et al. (2016).

Descripción del modelo y datos de entrada

El modelo de reconstrucción del EAN propuesto para este trabajo utiliza las características hidroclimáticas de la región para simular de forma retrospectiva la evolución del manto nival. Para ello, consideran que el 15 de enero toda la nieve se ha derretido y que el 15 de agosto se alcanza el máximo valor, evitando de esta manera tener que lidiar con la precipitación invernal.

El modelo utiliza como datos de entrada las series de cobertura nívea fraccional MODIS (MOD10A1), series de temperatura del aire y humedad relativa provenientes de estaciones meteorológicas y series grilladas de radiación solar incidente. Las mismas les permiten aplicar, con un paso de tiempo diario y para cada píxel de la grilla compatible con MODIS (500 m de resolución espacial) un modelo de derretimiento nival simplificado:

$$M_p = max\{(Q_{ns} + Q_{nlw}) \,.\, f_B + T_d \,.\, a_r;\ 0\}$$

$$M = M_p \,.\, fSCA$$

$$SWE_0 = \Sigma M_t;\ SWE_n = 0$$

donde M_P es el derretimiento potencial en el píxel, Q_{ns} es la radiación de onda corta neta, Q_{nlw} es la radiación de onda larga neta, T_d es la temperatura media diaria, f_B y α_r son parámetros de conversión a unidades compatibles con el derretimiento, $fSCA$ es la fracción del píxel cubierta con nieve, M_t es la nieve fusionada para el día t, SWE_0 es el valor máximo de equivalente agua en nieve (ó EAN por sus siglas en español) para la temporada en cuestión (15 de agosto) y SWE_n es el valor para el día 15 de enero.

Para evaluar las salidas del modelo, los autores utilizaron mediciones de colchones nivométricos, mediciones manuales realizadas para la zona circundante a la estación nivometeorológica y coeficiente de correlación entre el máximo EAN promedio simulado a escala de cuenca con respecto al derrame anual del río en cuestión, relación esta última que debiera ser fuerte (Masiokas et al., 2006, 2010).

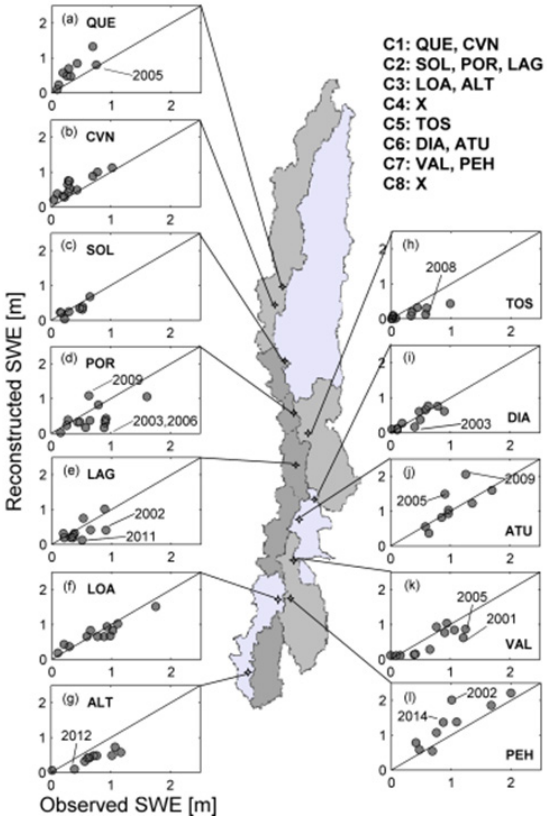
Resultados

Salvo en algún año en particular, las simulaciones del píxel donde se encuentra la estación nivométrica mostraron una alta correlación con respecto a las mediciones (Cuadro 6.15). A modo resumen, el coeficiente de determinación promedio fue de 0.74 para las estaciones en la vertiente occidental y de 0.43 para las del lado argentino. De forma global este valor fue de 0.61. Estos valores pueden ser considerados aceptables dadas las diferencias de escala (y por lo tanto procesos no simulados por el modelo) entre las observaciones de naturaleza puntual y las simulaciones con resolución de 500 m por 500 m.

Por su parte, el valor EAN máximo anual promedio de la cuenca dió valores de asociación fuerte con respecto al derrame de los ríos. Los resultados muestran relaciones simuladas por encima de la línea 1:1 en las cuencas del norte (probablemente porque el modelo

Cuadro 6.15

Comparación entre el equivalente en agua de la nieve (SWE por sus siglas en inglés) máximo reconstruido y el observado en los sitios con colchones de nieve. La línea continua representa el trazo con pendiente 1:1.



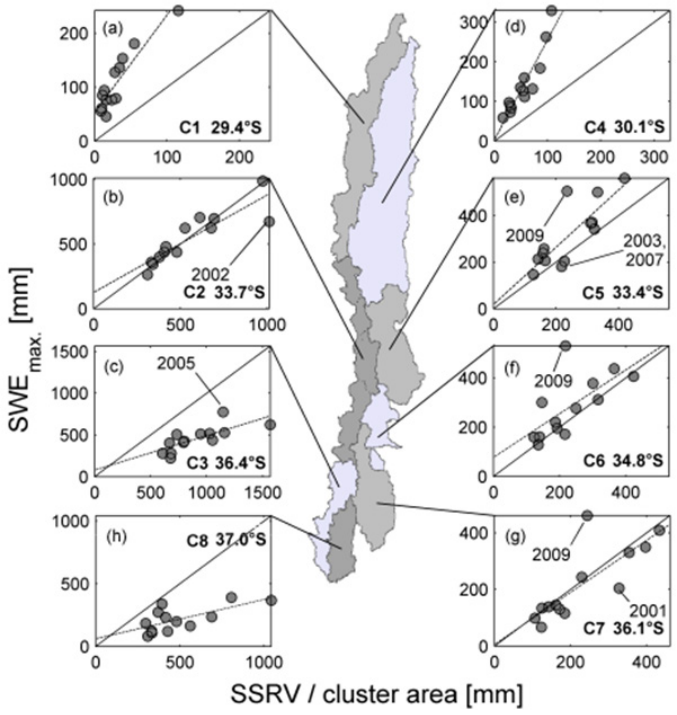
Fuente: Cornwell et al. (2016).

no considera la sublimación del manto nival), otras (sur de Chile) por debajo de la línea (donde las precipitaciones estivales son importantes), y relaciones muy cercanas a la pendiente unitaria para la zona central (Cuadro 6.16).

La gráfica muestra el promedio EAN para el 15 de septiembre (suponen que se alcanza el valor máximo anual) y las anomalías de cada año con respecto a la media. Para la zona norte (C1 y C4) el valor promedio fue de ~300 mm e.a., en el centro (C2, C5 y C6) ~750 mm e.a. y en el sur (C3, C7 y C8) ~650 mm e.a. (a pesar del decremento altitudinal de la Cordillera). Las transectas longitudinales de los mapas muestran que años secos presentan anomalías de distinta intensidad en las vertientes, mientras que inviernos con buenas nevadas dan como resultado anomalías similares.

Cuadro 6.16

Derrame específico de la temporada primavera-verano (SSRV por sus siglas en inglés) versus el EAN (ó SWE) máximo.Las zonas 1 a 3 incluyen ríos de la vertiente chilena (occidental); los grupos 4 a 8 corresponden a ríos argentinos (orientales). El trazo continuo representa la línea con pendiente 1:1.



Fuente: Cornwell et al. (2016).

Conclusiones

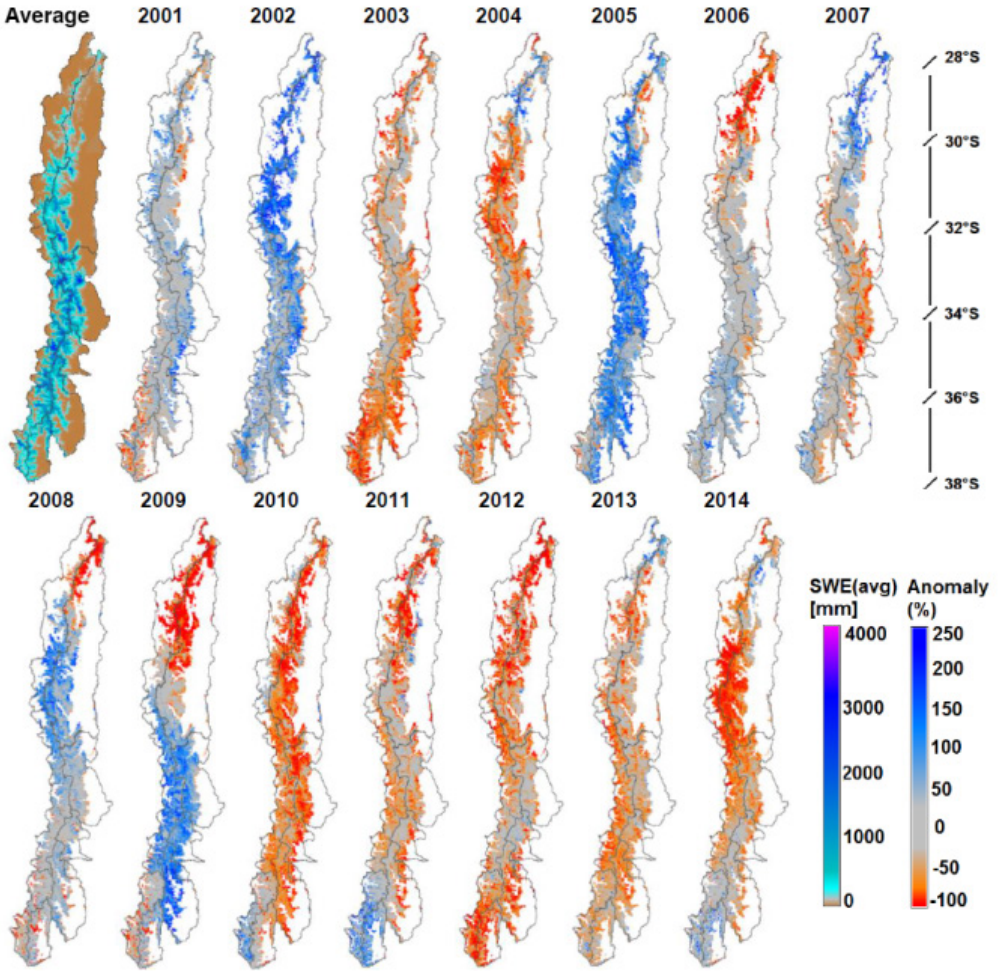
a. Los errores globales para el máximo EAN simulado con respecto a las mediciones en colchones nivométricos rondó el -2.2%, mientras que su correlación con respecto al derrame anual puntuó con un R^2 de 0.80. Esto sugiere que a pesar de las incertidumbres y errores asociados, el método dió resultados aceptables en el dominio de interés.

b. Las imágenes de cobertura nívea MODIS mostraron una nueva aplicación práctica, abriendo una nueva puerta en la práctica hidrológica para, por ejemplo, el pronóstico de derrames anuales.

c. Los mapas de EAN revelan la gran variabilidad espacio temporal de una variable fundamental para la generación de escurrimiento en una zona con escasez estructural de agua.

Cuadro 6.17

Climatología del EAN (ó SWE) máximo regional (15 de septiembre) para el período 2001–2014 (panel superior izquierdo), y anomalías del EAN máximo anual para cada año en cuestión.



Fuente: Cornwell et al. (2016).

6.5 DESAFÍOS

Los modelos numéricos se usan para predecir (e.g., pronosticar crecidas), sin embargo, dicho fin está enmarcado por la propia evolución del conocimiento hidrológico como rama de las Ciencias de la Tierra y por lo tanto direccionado, impulsado y demandado por las necesidades de la sociedad, oportunidades tecnológicas y soporte institucional en que los investigadores están inmersos en una momento y lugar determinados (Sivapalan y Blösch, 2017).

Dicho esto, las primeras décadas del siglo pasado (~1910 a 1970) vieron la aparición de los primeros modelos hidrológicos, que fueron desde relaciones empíricas simples para

pronosticar el agua disponible el año entrante en cuencas dominadas por la fusión nival, relaciones entre valores de registros de precipitación y crecidas del río, pasando por el desarrollo de curvas tipo (SCS) para la determinación crecidas frente a eventos de precipitación, hasta el desarrollo del hidrograma unitario y modelos de series de tiempo. Fue recién a partir de 1970, con la aparición de nuevas generaciones de computadoras y la necesidad de resolver otros problemas, que surgieron los primeros modelos numéricos.

Los mismos fueron desde esquemas con reservorios con pocos requerimiento en sus datos de entrada para realizar pronósticos de derrames en la industria hidroeléctrica (e.g., HBV en Suecia - Bergström y Lindström, 2015), pasando por modelos distribuídos de balance de energía del manto nival (Anderson, 1976), hasta sistemas grillados que resolvían las ecuaciones diferenciales del flujo subsuperficial no saturado permitiendo abordar problemas de calidad del agua (e.g., Sistema Hidrológico Europeo - Freeze and Harlan, 1969). Luego, a partir de 1990, los efectos del cambio climático y la impronta de otras actividades humanas sobre el ciclo hidrológico (e.g., cambios en el uso del suelo) dictaminaron la evolución hacia modelos que incorporaron ciclos del nitrógeno, carbono y nutrientes, así como su acoplamiento con modelos océano-atmosféricos (Sivapalan y Blösch, 2017).

En Mendoza, provincia que depende fundamentalmente del agua generada en la Cordillera y que atraviesa un periodo seco sin precedentes en el registro instrumental (Garreaud et al., 2020), la modelización hidrológica no debiera ser sólo un ejercicio académico sino una herramienta fundamental para la gestión de recursos hídricos en un contexto de creciente demanda y de proyecciones del clima poco auspiciosas en relación con la disponibilidad del recurso hídrico (Rivera et al., 2021).

De lo escrito en los párrafos anteriores debiera quedar explícito que **invertir en ciencia y tecnología**, es decir, en comprender mejor las distintas facetas del ciclo hidrológico, **es un acto indisoluble para la seguridad hídrica en la provincia y la región**. A continuación se lista una serie de desafíos (no extensiva) para los próximos años: 1) ampliar la red existente de estaciones nivometeorológicas en alturas superiores a los 4000 m s.n.m., área clave para la generación de escurrimiento actual y futura ya que el aumento de la temperatura debido a los efectos del cambio climático dará lugar a condiciones poco propicias para que se acumule nieve por debajo de esta cota; 2) llevar adelante estudios que den cuentas sobre el rol de la sublimación nival en la dinámica de la oferta hídrica en los Andes Extratropicales, ya que bajo condiciones futuras más secas y cálidas, este proceso puede tomar un peso importante en el balance hídrico; 3) liberar registros en curso y expandir redes de monitoreo de agua subterránea, mediciones que permitirán conectar la generación de agua superficial con la dinámica del agua subterránea tanto en Cordillera como en las zonas de llanura de la provincia, lo que además habilitará evaluar el impacto que las extracciones de agua subterránea podrían tener en la sustentabilidad de los acuíferos; 4) desarrollar modelos fundacionales de inteligencia artificial que acoplen oferta y demanda de agua a escala de todo el territorio provincial, habilitando el acceso masivo a información científicamente fundamentada sobre la dinámica del ciclo del agua en la provincia; 5) brindar cursos de formación a la nueva generación de profesionales en hidrología que contemplen los últimos avances científicos y tecnológicos disponibles.

6.6 BIBLIOGRAFÍA

Addor, N., Melsen, L.A., 2019. Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models. Water Resources Research 55, 378–390. https://doi.org/10.1029/2018WR022958

Ali, A.F., Xiao, C., Zhang, X., Adnan, M., Iqbal, M., Khan, G., 2018. Projection of future streamflow of the Hunza River Basin, Karakoram Range (Pakistan) using HBV hydrological model. J. Mt. Sci. 15, 2218–2235. https://doi.org/10.1007/s11629-018-4907-4

Anderson, E., 1976. A point energy and mass balance model of snow cover (Technical No. NWS 19). NOAA, USA.

Alonso-González, E., Aalstad, K., Baba, M.W., Revuelto, J., López-Moreno, J.I., Fiddes, J., Essery, R., Gascoin, S., 2022. The Multiple Snow Data Assimilation System (MuSA v1.0). Geoscientific Model Development 15, 9127–9155. https://doi.org/10.5194/gmd-15-9127-2022

Alvarez-Garreton, C., Boisier, J.P., Garreaud, R., Seibert, J., Vis, M., 2021. Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. Hydrology and Earth System Sciences 25, 429–446. https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021

Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., Farinotti, D., 2020. Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. The Cryosphere 14, 2005–2027. https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020

Ayala, Á., Schauwecker, S., MacDonell, S., 2023. Spatial distribution and controls of snowmelt runoff in a sublimation-dominated environment in the semiarid Andes of Chile. Hydrology and Earth System Sciences 27, 3463–3484. https://doi.org/10.5194/hess-27-3463-2023

Bergström, S., 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modelling. Hydrology Research 22, 123–136. https://doi.org/10.2166/nh.1991.0009

Bergström, S., Lindström, G., 2015. Interpretation of runoff processes in hydrological modelling-experience from the HBV approach. Hydrol. Process. 29, 3535–3545. https://doi.org/10.1002/hyp.10510

Beven, K., 2008. Environmental Modelling: An Uncertain Future?, 1 edition. ed. CRC Press, London.

Beven, K.J., 2012. Rainfall - Runoff Modelling, 2 edition. ed. Wiley, Chichester.

Braun, M.H., Malz, P., Sommer, C., Farías-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., Seehaus, T.C., 2019. Constraining glacier elevation and mass changes in South America. Nature Clim Change 9, 130–136. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7

Brooks, P.D., Gelderloos, A., Wolf, M.A., Jamison, L.R., Strong, C., Solomon, D.K., Bowen, G.J., Burian, S., Tai, X., Arens, S., Briefer, L., Kirkham, T., Stewart, J., 2021. Groundwater-Mediated Memory of Past Climate Controls Water Yield in Snowmelt-Dominated Catchments. Water Resources Research 57, e2021WR030605. https://doi.org/10.1029/2021WR030605

Burger, F., Ayala, A., Farias, D., Shaw, T.E., MacDonell, S., Brock, B., McPhee, J., Pellicciotti, F., 2019. Interannual variability in glacier contribution to runoff from a high-elevation Andean catchment: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. Hydrological Processes 33, 214–229. https://doi.org/10.1002/hyp.13354

Caro, A., Condom, T., Rabatel, A., Champollion, N., García, N., Saavedra, F., 2024. Hydrological response of Andean catchments to recent glacier mass loss. The Cryosphere 18, 2487–2507. https://doi.org/10.5194/tc-18-2487-2024

Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1988. Applied Hydrology. New York.

Ciarapica, L., Todini, E., 2002. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales. Hydrological Processes 16, 207–229. https://doi.org/10.1002/hyp.342

Cornwell, E., Molotch, N.P., McPhee, J., 2016. Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. Hydrology and Earth System Sciences 20, 411–430. https://doi.org/10.5194/hess-20-411-2016

Cortés, G., Margulis, S., 2017. Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. Geophysical Research Letters 44, 6859–6867. https://doi.org/10.1002/2017GL073826

Crespo, Sebastián A., Fernandoy, F., Cara, L., Klarian, S., Lavergne, C., 2020a. First snow, glacier and groundwater contribution quantification in the upper Mendoza River basin using stable water isotopes. Isotopes in Environmental and Health Studies 56, 1–20. https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1797713

Crespo, Sebastián Andrés, Lavergne, C., Fernandoy, F., Muñoz, A.A., Cara, L., Olfos-Vargas, S., 2020b. Where Does the Chilean Aconcagua River Come from? Use of Natural Tracers for Water Genesis Characterization in Glacial and Periglacial Environments. Water 12, 2630. https://doi.org/10.3390/w12092630

Donoho, D., 2017. 50 Years of Data Science. Journal of Computational and Graphical Statistics 26, 745–766. https://doi.org/10.1080/10618600.2017.1384734

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., Ruiz, L., 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. Nat. Geosci. 1–7. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5

Eythorsson, D., Clark, M., 2025. Toward Automated Scientific Discovery in Hydrology: The Opportunities and Dangers of AI Augmented Research Frameworks. Hydrological Processes 39, e70065. https://doi.org/10.1002/hyp.70065

Farías-Barahona, D., Wilson, R., Bravo, C., Vivero, S., Caro, A., Shaw, T.E., Casassa, G., Ayala, Á., Mejías, A., Harrison, S., Glasser, N.F., McPhee, J., Wündrich, O., Braun, M.H., 2020. A near 90-year record of the evolution of El Morado Glacier and its proglacial lake, Central Chilean Andes. Journal of Glaciology 66, 846–860. https://doi.org/10.1017/jog.2020.52

Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P., Bordoy, R., 2014. Does internal climate variability overwhelm climate change signals in streamflow? The upper Po and Rhone basin case studies. Science of The Total Environment 493, 1171–1182. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.014

Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., López, D., 2009. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S). Water Resources Research 45. https://doi.org/10.1029/2008WR006802

Ferri, L., Dussaillant, I., Zalazar, L., Masiokas, M.H., Ruiz, L., Pitte, P., Gargantini, H., Castro, M., Berthier, E., Villalba, R., 2020. Ice Mass Loss in the Central Andes of Argentina Between 2000 and 2018 Derived From a New Glacier Inventory and Satellite Stereo-Imagery. Front. Earth Sci. 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.530997

Freeze, R.A., Harlan, R.L., 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. Journal of Hydrology 9, 237–258. https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90020-1

Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrology and Earth System Sciences 21, 6307–6327. https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017

Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology 40, 421–439. https://doi.org/10.1002/joc.6219

Garreaud, R.D., Clem, K., Veloso, J.V., 2021. The South Pacific Pressure Trend Dipole and the Southern Blob. Journal of Climate 34, 7661–7676. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0886.1

Garreaud, R., Boisier, J.P., Alvarez-Garreton, C., Christie, D.A., Carrasco-Escaff, T., Vergara, I., Chávez, R.O., Aldunce, P., Camus, P., Suazo-Álvarez, M., Masiokas, M., Castro, G., Muñoz, A., Zambrano-Bigiarini, M., Fuster, R., Godoy, L., 2025. Hyperdroughts in central Chile: drivers, impacts, and projections. Hydrology and Earth System Sciences 29, 5347–5369. https://doi.org/10.5194/hess-29-5347-2025

Harder, P., Pomeroy, J., 2013. Estimating precipitation phase using a psychrometric energy balance method. Hydrological Processes 27, 1901–1914. https://doi.org/10.1002/hyp.9799

Hrachowitz, M., Clark, M.P., 2017. HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. Hydrology and Earth System Sciences 21, 3953–3973. https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. Nature 592, 726–731. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z

Hutton, C., Wagener, T., Freer, J., Han, D., Duffy, C., Arheimer, B., 2016. Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science? Water Resources Research 52, 7548–7555. https://doi.org/10.1002/2016WR019285

Konz, M., Seibert, J., 2010. On the value of glacier mass balances for hydrological model calibration. Journal of Hydrology 385, 238–246. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.025

Leiva, J.C., Cabrera, G.A., Lenzano, L.E., 2007. 20 years of mass balances on the Piloto glacier, Las Cuevas river basin, Mendoza, Argentina. Global and Planetary Change, Mass Balance of Andean Glaciers 59, 10–16. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.018

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201, 272–288. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3

Liston, G.E., 1995. Local Advection of Momentum, Heat, and Moisture during the Melt of Patchy Snow Covers. https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/34/7/1520-0450-34_7_1705.xml

Liston, G.E., Hall, D.K., 1995. An energy-balance model of lake-ice evolution. Journal of Glaciology 41, 373–382. https://doi.org/10.3189/S0022143000016245

Liston, G.E., Elder, K., 2006a. A Meteorological Distribution System for High-Resolution Terrestrial Modeling (MicroMet). Journal of Hydrometeorology 7, 217–234. https://doi.org/10.1175/JHM486.1

Liston, G.E., Elder, K., 2006b. A Distributed Snow-Evolution Modeling System (SnowModel). Journal of Hydrometeorology 7, 1259–1276. https://doi.org/10.1175/JHM548.1

Liston, G.E., Sturm, M., 1998. A snow-transport model for complex terrain. Journal of Glaciology 44, 498–516. https://doi.org/10.3189/S0022143000002021

Liu, J., Yuan, X., Zeng, J., Jiao, Y., Li, Y., Zhong, L., Yao, L., 2022. Ensemble streamflow forecasting over a cascade reservoir catchment with integrated hydrometeorological modeling and machine learning. Hydrology and Earth System Sciences 26, 265–278. https://doi.org/10.5194/hess-26-265-2022

Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Le Quesne, C., Aravena, J.C., 2006. Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. J. Climate 19, 6334–6352. https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1

Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Mauget, S., 2010. Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. J. Hydrometeor. 11, 822–831. https://doi.org/10.1175/2010JHM1191.1

Masiokas, M.H., Christie, D.A., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba, R., Luckman, B.H., Berthier, E., Nussbaumer, S.U., González-Reyes, Á., McPhee, J., Barcaza, G., 2016. Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data. The Cryosphere 10, 927–940. https://doi.org/10.5194/tc-10-927-2016

Masiokas, M.H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J.L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., MacDonell, S., 2020. A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. Front. Earth Sci. 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099

McCarthy, M., Meier, F., Fatichi, S., Stocker, B.D., Shaw, T.E., Miles, E., Dussaillant, I., Pellicciotti, F., 2022. Glacier Contributions to River Discharge During the Current Chilean Megadrought. Earth's Future 10, e2022EF002852. https://doi.org/10.1029/2022EF002852

Pomeroy, J.W., Brown, T., Fang, X., Shook, K.R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S.A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z.,

Kompanizare, M., Lopez Moreno, J.I., 2022. The Cold Regions Hydrological Modelling Platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding. Journal of Hydrology 128711. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711

Pomeroy, J.W., Fang, X., Marks, D.G., 2016. The cold rain-on-snow event of June 2013 in the Canadian Rockies — characteristics and diagnosis. Hydrological Processes 30, 2899–2914. https://doi.org/10.1002/hyp.10905

R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

Ragettli, S., Pellicciotti, F., 2012. Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glaciometeorological processes to constrain model parameters. Water Resour. Res. 48, W03509. https://doi.org/10.1029/2011WR010559

Ragettli, S., Cortés, G., McPhee, J., Pellicciotti, F., 2014. An evaluation of approaches for modelling hydrological processes in high-elevation, glacierized Andean watersheds. Hydrol. Process. 28, 5674–5695. https://doi.org/10.1002/hyp.10055

Réveillet, M., MacDonell, S., Gascoin, S., Kinnard, C., Lhermitte, S., Schaffer, N., 2020. Impact of forcing on sublimation simulations for a high mountain catchment in the semiarid Andes. The Cryosphere 14, 147–163. https://doi.org/10.5194/tc-14-147-2020

Rivera, J.A., Naranjo Tamayo, E., Viale, M., 2020. Water Resources Change in Central-Western Argentina Under the Paris Agreement Warming Targets. Frontiers in Climate 2. https://doi.org/10.3389/fclim.2020.587126

Rivera, J.A., Otta, S., Lauro, C., Zazulie, N., 2021. A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. Front. Water 3. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544

Sedlar, J., Hock, R., 2009. Testing longwave radiation parameterizations under clear and overcast skies at Storglaciären, Sweden. The Cryosphere 3, 75–84. https://doi.org/10.5194/tc-3-75-2009

Sivapalan, M., Blöschl, G., 2017. The Growth of Hydrological Understanding: Technologies, Ideas, and Societal Needs Shape the Field. Water Resources Research 53, 8137–8146. https://doi.org/10.1002/2017WR021396

Slater, L.J., Thirel, G., Harrigan, S., Delaigue, O., Hurley, A., Khouakhi, A., Prodoscimi, I., Vitolo, C., Smith, K., 2019. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 1–33. https://doi.org/10.5194/hess-2019-50

Szalay, A., Gray, J., 2006. Science in an exponential world. Nature 440, 413–414. https://doi.org/10.1038/440413a

Toum, E., Masiokas, M.H., Villalba, R., Pitte, P., Ruiz, L., 2021. The HBV.IANIGLA Hydrological Model. The R Journal 13, 378–395. https://doi.org/10.32614/RJ-2021-059

Toum, E., Rivera, J.A., Viale, M., 2023. Proyecciones del clima y de la oferta hídrica para las próximas décadas en la provincia de Mendoza (Technical No. 01). Departamento General de Irrigación, Mendoza.

Toum, E., Villalba, R., Masiokas, M.H., 2025. Snow and Glacier Contributions to the Mendoza River in the Semiarid Central Andes of Argentina. Hydrological Processes 39, e70132. https://doi.org/10.1002/hyp.70132

Viale, M., Nuñez, M.N., 2010. Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. J. Hydrometeor. 12, 481–507. https://doi.org/10.1175/2010JHM1284.1

Vionnet, V., Brun, E., Morin, S., Boone, A., Faroux, S., Le Moigne, P., Martin, E., Willemet, J.-M., 2012. The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2. Geoscientific Model Development 5, 773–791. https://doi.org/10.5194/gmd-5-773-2012

Viviroli, D., Archer, D.R., Buytaert, W., Fowler, H.J., Greenwood, G.B., Hamlet, A.F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M.I., López-Moreno, J.I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., Woods, R., 2011. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management

and policy. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15, 471–504. https://doi.org/10.5194/hess-15-471-2011

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M., Wada, Y., 2020. Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources. Nature Sustainability 3, 917–928. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9

Wayand, N.E., Marsh, C.B., Shea, J.M., Pomeroy, J.W., 2018. Globally scalable alpine snow metrics. Remote Sensing of Environment 213, 61–72. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.012

7 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA ALTA CUENCA DEL RÍO ATUEL

Héctor Abel Segal[10]

7.1 RESUMEN

Se analiza la cuenca del río Atuel, eligiendo puntos de cierre acorde sitios de aforo en la alta cuenca del río Atuel, aguas arriba del sistema de embalses sobre el río, para determinar subcuencas, y para cada una de estas se determinan los parámetros morfométricos de las cuencas y gráficos que las caracterizan. También se analizan algunas curvas que identifican el escurrimiento. Se explica la utilidad de estos parámetros para comprender la dinámica del escurrimiento y se la relaciona con la modelación de éste mediante un modelo HBV genérico, en caso de ser posible.

7.2 Introducción

La cuenca del río Atuel, ubicada en el sur de la provincia de Mendoza, constituye un sistema complejo donde interactúan procesos hidrológicos, geológicos y climáticos. El presente informe describe detalladamente las características morfométricas de las subcuencas más relevantes de la cuenca del Atuel, analizando curvas hipsométricas, polígonos de frecuencias y parámetros fundamentales para comprender la dinámica del escurrimiento superficial y subterráneo.

10 Jefe Div. Evaluación de Recursos Hídricos, Departamento de Hidrología, Departamento General de Irrigación.

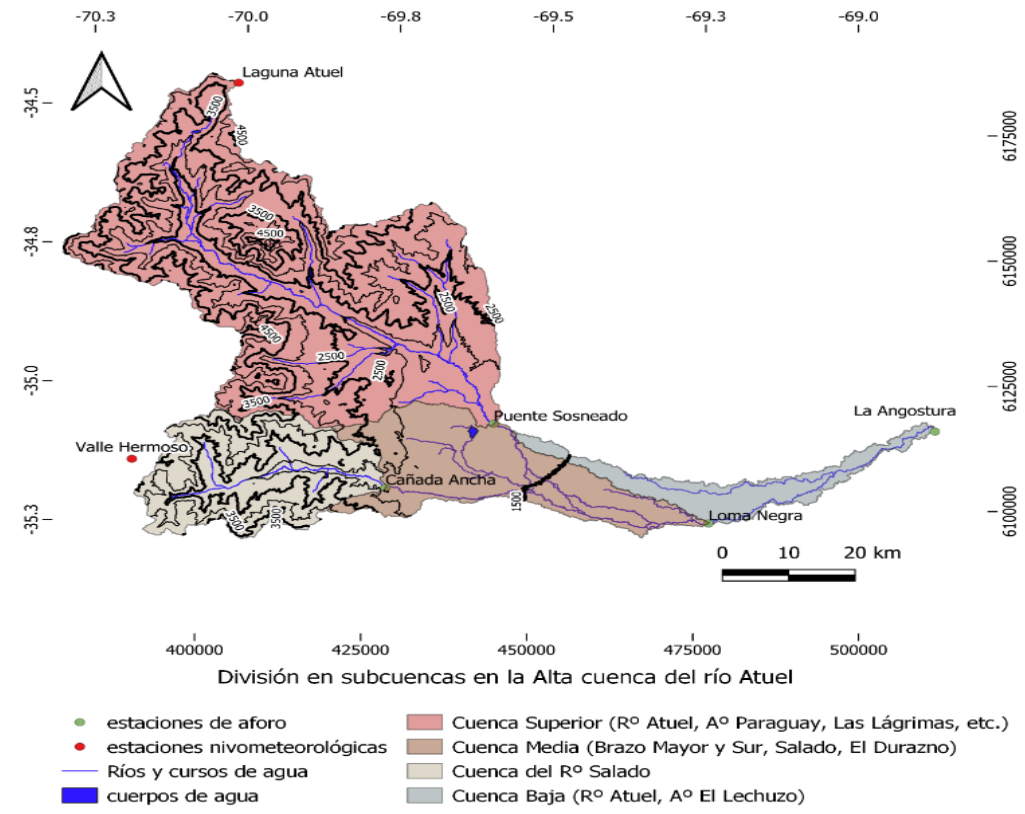
7.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis se apoyó en el Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS PALSAR, de 12,5 m de resolución, procesado mediante software SIG como QGIS, GRASS y ArcMap. Para el cálculo de parámetros morfométricos, se utilizaron métricas derivadas del DEM, incluyendo el índice de Gravelius, razón de elongación, pendiente media y el índice hipsométrico altitudinal.

Las curvas hipsométricas y polígonos de frecuencias se desarrollaron para cada subcuenca, permitiendo evaluar estados de equilibrio geomorfológico. Se analizaron también los aportes de los arroyos principales y las zonas de infiltración, que influyen en la disponibilidad de caudales.

La cartografía e información provista por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) a través del Atlas Argentino de Glaciares ha sido utilizada como referencia para visualizar la ubicación e importancia de los glaciares en la cuenca.

Cuadro 7.1 **Subcuencas del río Atuel aguas arriba de La Angostura**



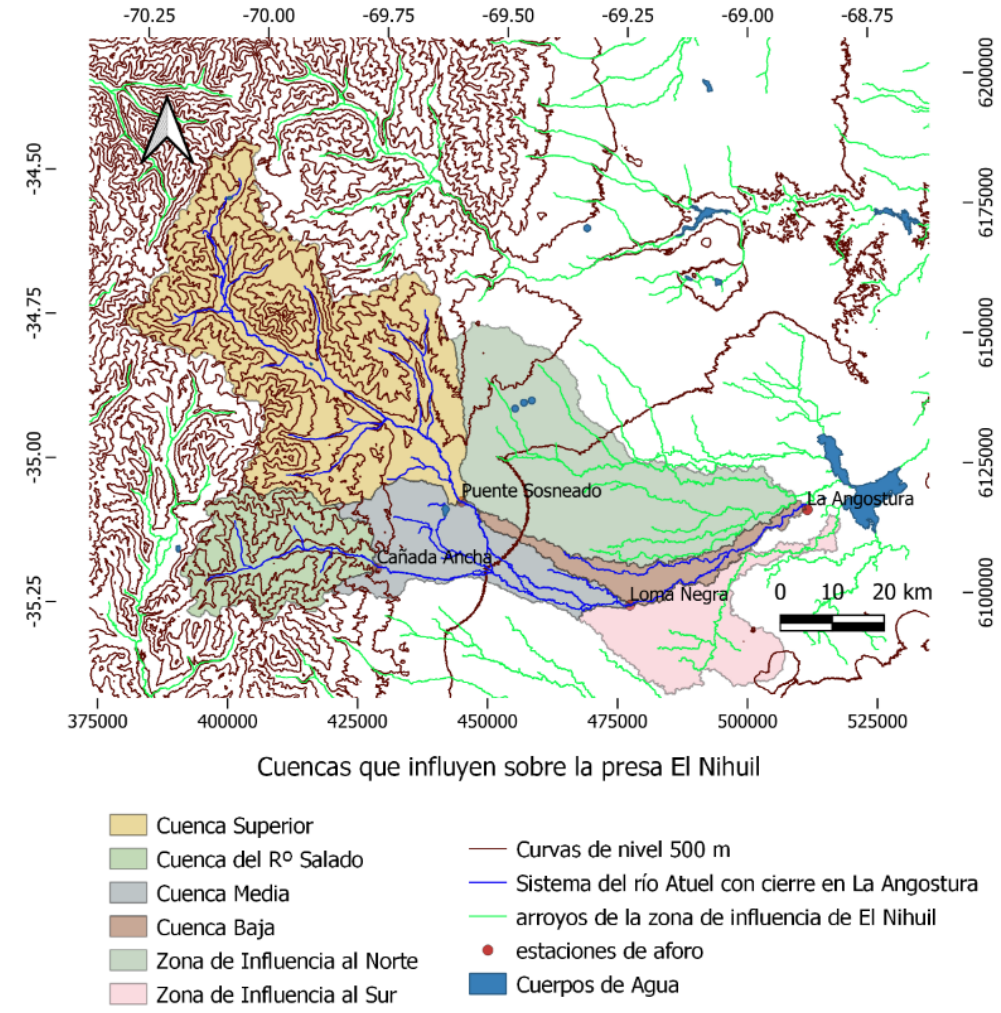
Fuente: Elaboración propia

7.4 DIVISIÓN EN SUBCUENCAS

Dado que en la cuenca del río Atuel existen estaciones de aforo en la parte alta de la cuenca, en Puente Sosneado y Cañada Ancha, sobre los ríos Atuel y Salado respectivamente, y en la cuenca inferior, en Loma Negra y La Angostura, se determinaron las cuencas con cierre en esas estaciones. El trazado mencionado puede verse en los Cuadros 7.1 y 7.2.

La determinación de subcuencas depende de la elección de los puntos de cierre y de la resolución del DEM, entre otros factores. Trazados previos, con un DEM de menor resolución, basado en SRTM, con resolución de 30 m, determinan en la zona cercana a La Angostura, de

Cuadro 7.2 **Subcuencas del río Atuel aguas arriba de La Angostura mostrando las zonas de influencia al sur y norte**



Fuente: Elaboración propia

muy bajas pendientes, dos lóbulos al Sur y Norte que se presentan en la siguiente Cuadro con el nombre de Zona de Influencia al Norte y Sur.

La imagen permite distinguir la complejidad de los aportes, y eventualmente drenajes, en la zona próxima a El Nihuil.

Los glaciares se presentan en el límite oeste de la cuenca y en la subcuenca Superior, con cierre en Puente Sosneado.

El Cuadro 7.3, muestra un resumen de los derrames en la cuenca de aporte al embalse, en las distintas estaciones de aforo, y los obtenidos por diferencia de embalse en la presa El Nihuil, en el periodo 2000-2021.

Cuadro 7.3 **Características principales de las subcuencas del río Atuel**

Subcuenca	Área	Perímetro	Centroide			Índice de Gravelius
			X	Y	Z	
Puente Sosneado	2 358 km²	397 km	415 650 m	6 146 668 m	3 368 msnm	2.30
Cañada Ancha	665 km²	180 km	409 101 m	6 107 652 m	3 267 msnm	1.97
Atuel Medio	641 km²	277 km	444 173 m	6 107 990 m	2 039 msnm	3.08
Atuel Bajo	267 km²	311 km	480 760 m	6 105 935 m	1 433 msnm	5.37

Fuente: Elaboración propia

7.5 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

La descripción de los parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas se ha tomado de diversas fuentes, intentando en el Cuadro 7.4 una síntesis de ellas. (Trujillo) (Sandra del Águila).

Cuadro 7.4 Tabla resumen de parámetros morfométricos e hipsométricos y su relevancia hidrológica

Parámetro	Interpretación	Cálculo	Relevancia para modelar la cuenca y la escorrentía (lluvia / nieve)
Altura mínima (msnm)	Cota más baja de la cuenca (cercana al exutorio)	$\min(H)$	Controla el nivel de base y suele coincidir con la cota de salida. Con nieve, ayuda a estimar el gradiente térmico y dónde la precipitación tiende a ser lluvia.
Altura máxima (msnm)	Cota más alta del relieve	$\max(H)$	Indica posibilidad de zonas frías y persistencia nival. Cuencas con Hmax alta tienden a tener almacenamiento nival y caudales más tardíos (deshielo).
Desnivel máximo (m)	Rango altitudinal total	$H_{max} - H_{min}$	Afecta el gradiente climático y de temperatura; mayor desnivel suele implicar mayor heterogeneidad de lluvia/nieve y tiempos de respuesta distintos por altura.
Área máxima (km²)	Tamaño de la cuenca	Área polígono	Escala la magnitud del caudal y el tiempo de concentración (en general cuencas grandes responden más lento). También afecta la agregación espacial de precipitación y nieve.
Altura media (m)	Promedio altitudinal ponderado por área	$\bar{H}$	Se usa como indicador del régimen térmico medio. En cuencas nivales es muy útil para estimar la proporción de precipitación sólida y el timing del deshielo.
Altura mediana (msnm)	Cota que divide el área en mitades	Percentil 50	Resume la distribución altitudinal; útil para describir si la cuenca "concentra" área en altas o bajas cotas. Afecta la sensibilidad a cambios de temperatura (lluvia vs nieve).
Área sobre altura mediana (km²)	Área por encima de la mediana	Área $(H \geq H_{med})$	Aproxima cuánta superficie está en cotas potencialmente más frías. Con nieve, ayuda a inferir área de acumulación nival y potencial de aporte por deshielo.
Área bajo curva hipsométrica (adim.)	Integral de la curva hipsométrica (distribución altitudinal)	$\int_0^1 a(h)dh$	Resume si la cuenca tiene gran proporción de área en cotas altas o bajas. Influye en almacenamiento nival, en la variabilidad espacial de precipitación y en la persistencia de nieve.
Longitud de la cuenca (km)	Dimensión longitudinal principal	Aprox, siguiendo la traza del río desde el cierre y trazando una recta desde su fin al punto más alejado de la cuenca.	Relacionada con el tiempo de viaje y el tiempo de concentración. Cuencas más largas suelen atenuar picos. Importante en modelos de transformación lluvia–caudal.

Parámetro	Interpretación	Cálculo	Relevancia para modelar la cuenca y la escorrentía (lluvia / nieve)
Perímetro (km)	Complejidad del contorno	Longitud borde	Vinculado a irregularidad y potencial heterogeneidad fisiográfica. Puede correlacionar con mayor complejidad de subáreas y rutas de escurrimiento.
Ancho medio (km)	Ancho equivalente	$B = A/L$	Afecta la compacidad y la capacidad de generar picos rápidos. Anchos grandes con L relativamente pequeña suelen responder más "concentrado".
Radio equivalente (km)	Radio de círculo de igual área	$R_{eq} = \sqrt{A/\pi}$	Base para índices de forma. Cuencas "más circulares" suelen tener respuesta más rápida y picos mayores (mayor simultaneidad de aportes).
Factor de forma	Compacidad (relación área–longitud)	A/L^2	Kf alto → cuenca más compacta → picos más altos y respuesta rápida ante lluvia intensa.
Índice de Gravelius	Irregularidad respecto a un círculo	$\frac{P}{2\pi R_{eq}}$	Cuanto mayor, menos circular. Cuencas más circulares (Kc cercano a 1) tienden a picos más intensos; más irregulares tienden a atenuación.
Razón de elongación	Grado de elongación	$2R_{eq}/L$	Re cercano a 1 → circular (rápida concentración); Re menor → alargada (picos más bajos, mayor tiempo de respuesta). Útil para inferir forma del hidrograma.
Índice hipsométrico altitudinal (HI)	Posición altitudinal media normalizada	$(\bar{H} - H_{min})$ AUC	Resume distribución altitudinal. HI alto sugiere mayor peso de áreas altas → más posibilidad de nieve y liberación retardada (deshielo). Importante en modelos con módulo nival.
Pendiente media del cauce ppal. (%)	Gradiente del canal principal	$S = \frac{100\Delta H}{L_{cauce}}$	Controla velocidad de propagación y energía del flujo. Pendientes altas → respuesta más rápida, menor almacenamiento en cauce; pendientes bajas → mayor atenuación y almacenamiento. En nieve, puede influir en la velocidad de drenaje durante deshielo.

Fuente: Elaboración propia

Un breve resumen de la influencia de estas variables en los parámetros que calibran un modelo HBV, tomando como modelo HBV Light, es el Cuadro 7.5.

Cuadro 7.5 **Parámetros morfométricos y su influencia en HBV (las flechas indican incremento o disminución)**

Parámetro HBV	Morfometría dominante
MAXBAS ↑	Área ↑, Longitud ↑, Elongación ↑, Pendiente ↓
MAXBAS ↓	Compactación ↑, Pendiente ↑
K0 / K1 ↑	Pendiente ↑, Compactación ↑, Zona baja amplia
K2 ↓	Área ↑, Altura ↑, Dominio nival
TT ↓	Altura media/mediana ↑, AUC/HI ↑
CFMAX ↑	Pendiente ↑, Desnivel ↑

Fuente: Elaboración propia

Si bien los parámetros del modelo HBV no se derivan directamente de la morfometría de la cuenca, la literatura reconoce que las características fisiográficas y altitudinales son fundamentales para definir rangos plausibles de parametrización y para interpretar los resultados de la calibración.

Esta vinculación se deriva del hecho de ser HBV un modelo conceptual, según se comenta explícitamente en. (Publications, Computer Models of Watershed Hydrology), de donde se transcribe: "Catchment characteristics are essential for defining reasonable parameter ranges and for interpreting calibration results."

También en (Journal of Hydrology, 1997) se relaciona hipsometría con rutinas de nieve y se justifica el uso de bandas de altura.

El manual de HBV Light (Hydrological, 2005) especifica que parámetros como MAXBAS representan el efecto agregado del ruteo y la forma de la cuenca, que TT y CFMAX dependen del régimen térmico y la altitud y que los parámetros deben elegirse dentro de rangos consistentes con la fisiografía.

Adicionalmente, (Chow, 1988) y (Dingman, 2015) describen la relación entre forma de cuenca, longitud, pendiente y el tiempo de concentración, la forma del hidrograma y la atenuación de picos.

7.6 Resumen de gráficos característicos y utilidad en modelación

En todos los casos, los parámetros de HBV de la descripción corresponden al modelo HBV -Light. (Cuadro 7.6)

Algunos de los mencionados son:

TT — Threshold Temperature: Temperatura umbral que separa precipitación sólida (nieve) de líquida (lluvia). [°C] . Idem en RS Minerve (CREALP).

CFMAX — Degree-Day Factor: Factor de fusión nival basado en grados-día. [mm $°C^{-1}$ $día^{-1}$]. Idem en RS-Minerve.

UZL — Upper Zone Limit: Umbral de almacenamiento en la zona superior a partir del cual se activa el flujo rápido. (escorrentía superficial) [mm], en HBV de RS Minerve es SUMax.

K0 — Recession Coefficient 0: Coeficiente de recesión del flujo rápido desde la zona superior cuando UZL es superado, es decir respuesta muy rápida a eventos intensos [dia^{-1}]. Kr en HBV RS Minerve.

K1 — Recession Coefficient 1: Coeficiente de recesión del flujo intermedio desde la zona superior, velocidad de vaciado del almacenamiento superior en condiciones normales [dia^{-1}]. Ku en HBV RS Minerve.

MAXBAS — Routing Parameter: Longitud (en pasos de tiempo) del filtro triangular usado para suavizar el caudal simulado, valores grandes, mas suavizado y retrasado. [paso de tiempo de simulación]. No existe en RS Minerve, que tiene rutina de tránsito.

7.6.1 Características de las subcuencas

Esta sección describe en detalle la morfología, procesos erosivos, pendientes, aportes hídricos y características hipsométricas de la subcuenca. Se incluyen métricas morfométricas clave como la relación de elongación, índice de Gravelius, integral hipsométrica y pendientes medias.

La interpretación de las curvas hipsométricas permite evaluar el estado evolutivo de la cuenca: valores altos de la integral hipsométrica (>60%) indican juventud, mientras que valores menores al 30% representan senectud geomorfológica. En paralelo, los polígonos de frecuencias permiten analizar la distribución altitudinal y estimar áreas críticas de infiltración o erosión.

Cuadro 7.6 Gráficos característicos de la subcuenca

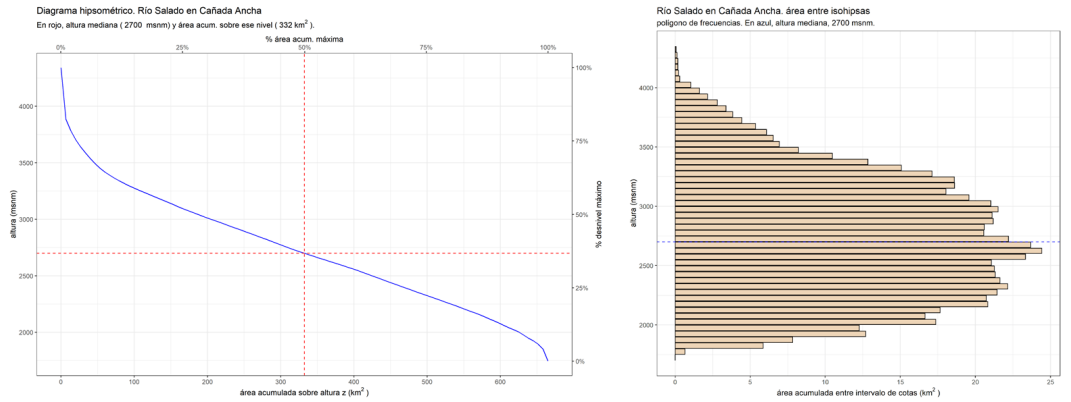
Producto (gráfico/ perfil)	Interpretación	Relevancia hidrológica y para HBV (lluvia / nieve)
Perfil longitudinal del cauce principal	Variación de altitud vs distancia a lo largo del cauce principal (desde naciente hasta exutorio), reflejando cambios de pendiente y energía fluvial.	• Informa sobre el tiempo de propagación y la dinámica de concentración del flujo → orientación para el ruteo (MAXBAS) y para interpretar crecidas rápidas (pendientes altas). • Relacionable con respuesta rápida/lenta del modelo (p.ej., sensibilidad de parámetros de salida rápida: K0–K1 y umbrales como UZL). • En cuencas nivales, ayuda a entender drenaje durante deshielo (eficiencia de conducción).
Curva hipsométrica	Distribución relativa del área de la cuenca en función de la altura (relación entre área acumulada y cota, normalizada). Resume el "estado" geomorfológico del relieve.	• Muy útil en HBV con nieve: indica cuánta superficie está en cotas altas → guía para definir bandas elevacionales y evaluar la importancia del módulo nival (parámetros TT, CFMAX). • Apoya la interpretación de estacionalidad: cuencas con área dominante en altura tienden a tener aporte por deshielo y mayor sensibilidad a temperatura. • También sugiere heterogeneidad espacial de precipitación efectiva.
Polígono de frecuencias altimétricas (porcentaje de área por clases)	Distribución estadística de las alturas dentro de la cuenca, mostrando qué proporción de área cae en cada intervalo altitudinal.	• Directamente útil para HBV con nieve: define de manera natural las bandas elevacionales para correr la rutina nival (precipitación sólida/líquida y deshielo por altura). • Permite relacionar respuesta a eventos: si el área se concentra en alturas frías, la lluvia efectiva puede ser menor en invierno (más nieve) y aumentar en primavera (deshielo). • Ayuda a justificar gradientes T/P si se aplican correcciones por altura.

Fuente: Elaboración propia

7.6.2 Subcuenca Río Salado – Cañada Ancha

En esta subcuenca se ubican entre otros los arroyos de Las Leñas, Nilo, Los Rosillos y El Desecho, que confluyen al río Salado, que vierte caudales importantes al río Atuel (Cuadro 7.7). Como se comentó previamente, parte de estos caudales se insumen, y aportan tanto al acuífero, como a la Laguna de Llancanelo, en forma sub-superficial, a través del arroyo Malo y otros.

Cuadro 7.7 **Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias del río Salado con cierre en Cañada Ancha**



Fuente: Elaboración propia

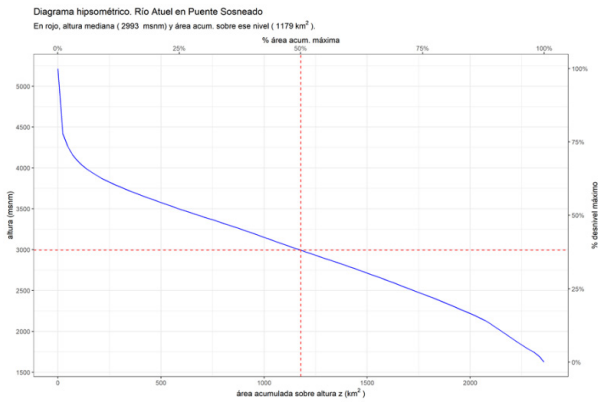
7.6.3 Subcuenca Atuel Superior – Puente Sosneado

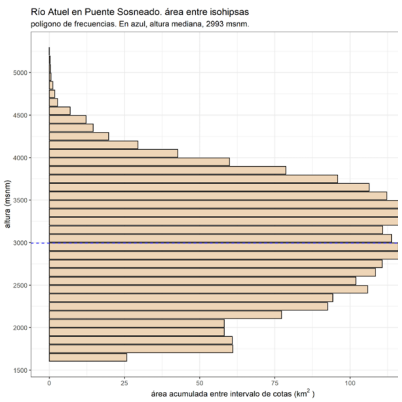
Es una cuenca más elongada que la del río Salado (Cuadro 7.8), con flujos más lentos, lo que se refleja en la razón de elongación y el mayor índice de Gravelius. Se observa en correspondencia una menor pendiente del cauce principal. La integral de la hipsométrica muestra valores similares a los de la cuenca del Salado, como el índice hipsométrico altitudinal, con características de relieve y procesos erosivos similares.

La cuenca superior del río Atuel nace a partir de arroyos que vierten a la Laguna del Atuel, al pie del volcán Overo. La influencia del vulcanismo es fundamental en la morfología de este río, originando un área cárstica, como así también la presencia de glaciares, que origina numerosas masas de derrubio y capas morénicas.

La Laguna del Atuel recibe aguas de origen glaciar. Esta laguna tiene, como la Laguna del Diamante, dos espejos de agua, una de las cuales actúa como decantadora de la otra. De ella nace el río Atuel. Tras su nacimiento, incorpora los aportes de los arroyos Los Gateados y Rosillo por margen derecha, y por margen izquierda, de los arroyos de las Yeseras, Pajaritos, Oscuro, Colorado.

Cuadro 7.8 Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias del río Salado con cierre en Puente Sosneado





Fuente: Elaboración propia

El arroyo de Las Lágrimas transporta aguas desde las altas cumbres que forman el límite internacional y la divisoria de aguas con la cuenca del río Grande, llegando al Atuel por margen izquierda. Por esa misma margen recibe posteriormente aguas de los arroyos La Manga, Los Pantanos, Los Caballos, y aguas abajo del cerro de Las Mesillas, de los arroyos de Las Ánimas, Las Piedras, Felipe y del arroyo Paraguay, formado por los arroyos Paulino y Pamur.

Por margen derecha, aguas abajo del arroyo Colorado, se unen al río Atuel los arroyos Nilo, Las Rosas y Desecho. Luego afluyen por esa margen los arroyos de las Rosas, Malo y Bayo. Posteriormente se unen los ríos Largo, Agua Buena, el Freno, Las Chircas y Blanco. El arroyo de La Manga, el más importante de este tramo, que nace en la Cuchilla de la Tristeza, accede en este tramo por margen derecha al río Atuel algo más abajo.

Cabe citar también al arroyo Bayo, que alimenta a la Laguna del Sosneado, aunque sin unirse al Atuel.

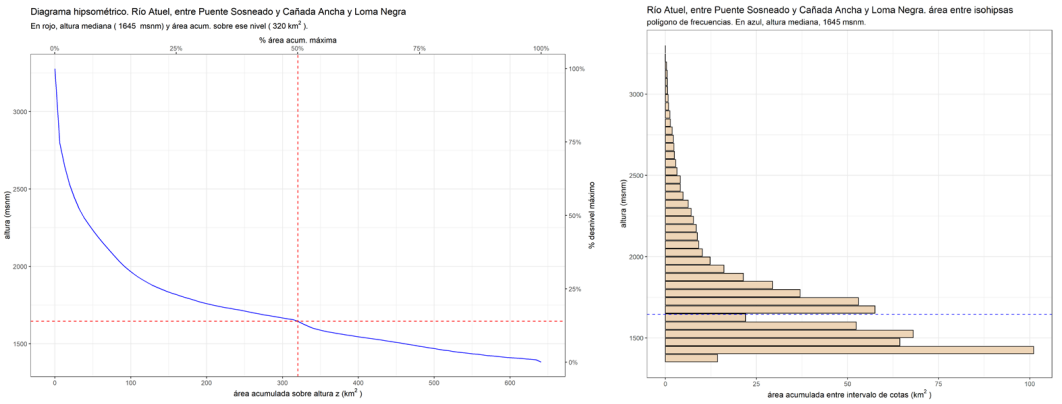
Los ríos Colorado Norte y Sur se unen al Atuel por margen izquierda, antes de Puente Sosneado (Inchauspe).

7.6.4 Cuenca Media – Entre Puente Sosneado, Cañada Ancha y Loma Negra

El índice hipsométrico altitudinal es marcadamente distinto (Cuadro 7.9), reflejando otro tipo de procesos erosivos y relieve. La integral hipsométrica, inferior a 0.3, apunta a una cuenca muy erosionada, que tradicionalmente se asocia a fase de vejez.

Al oeste de esta subcuenca se ubica la Laguna Blanca, salitrosa, y sin aportes de importancia al río Atuel.

Cuadro 7.9 **Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias de la Cuenca Media (entre C. Ancha y L. Negra)**



Fuente: Elaboración propia

El río Atuel se abre en los brazos Mayor y Sur aguas debajo de Puente Sosneado. Más debajo de Las Juntas, numerosos arroyos y vertientes confluyen y forman el río Atuel, en la zona llamada La Junta.

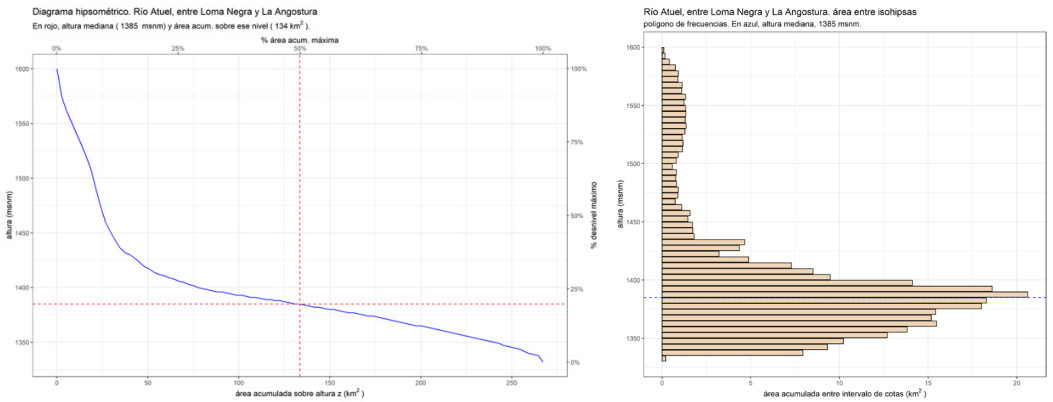
7.6.5 Subcuenca Baja – Entre Loma Negra y La Angostura

La subcuenca inferior, entre Loma Negra y La Angostura, recibe aguas por margen derecha del Arroyo El Lechuzo, que confluye al río Atuel aguas arriba de La Angostura (Cuadro 7.10). Toda esta zona, y la región al norte y sur de ella, tienen muy poca pendiente, y son zonas de vertientes e infiltración. Esa poca pendiente hace muy difícil la delimitación de subcuencas en esta zona, como se ha señalado previamente. Parte de los caudales arriban directamente al embalse El Nihuil por las zonas al este y oeste de la cuenca, como se señaló previamente. Para el nivel de agregación con el que se ha trazado la hipsométrica, existen zonas de pendiente indeterminada, por variación de altura nula.

Se han realizado además dos divisiones de cuenca adicionales, una que incluye toda la cuenca con cierre en Loma Negra y otra con cierre en La Angostura, con el fin de realizar y comparar modelaciones, ya que las sumas de aportes de las cuencas no reflejan los procesos de las derivaciones hacia Llancanelo y otras cuencas.

En el Cuadro 7.11, se muestra un resumen de los derrames en la cuenca de aporte al embalse, en las distintas estaciones de aforo, y los obtenidos por diferencia de embalse en la presa El Nihuil, en el periodo 2000-2021.

Cuadro 7.10 Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias de la Subcuenca Baja (entre L. Negra y La Angostura)



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.11 Balance de Subcuencas y entradas y salidas al embalse El Nihuil

Magnitud	Cañada Ancha	Puente Sosneado	Loma Negra	La Angostura	Afluente (dif. Embalse) a El Nihuil
Caudal medio (m³/s)	8.60	33.05	30.66	33.24	30.81
Derrame anual medio (hm³)	271.3	1042.9	967.6	1048.9	972.2

Fuente: Elaboración propia

De la inspección de los derrames de la tabla previa, se puede observar que la suma de los derrames en Puente Sosneado y Cañada Ancha es muy superior (36%) al derrame en Loma Negra, estación ubicada aguas debajo de esta. La diferencia con La Angostura es del 25%.

Entre Loma Negra y La Angostura los derrames anuales se incrementan en 81 hm³. Sobre esta base, se deduce que un 8% del derrame en La Angostura se produce por aportes, predominantemente pluviales, entre ambas estaciones.

Por otra parte, entre La Angostura y el ingreso a La Angostura el derrame se reduce en 77 hm³, un 7% respecto de los valores en La Angostura. Esta pérdida, en una longitud de solo 8 km, se debe tanto a infiltración, como a derivaciones laterales en esta zona de dirección de drenaje poco definida.

Cabe destacar que los ingresos a El Nihuil son muy similares a los valores registrados en Loma Negra.

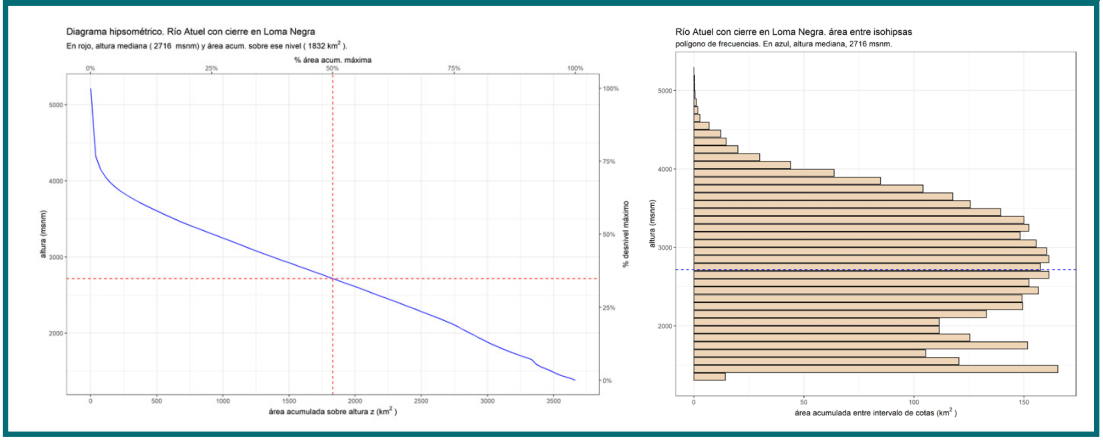
Las dos divisiones de cuencas adicionales antes mencionadas se resumen a continuación:

Cuadro 7.12 Características principales de las subcuencas del río Atuel con cierre en Loma Negra y en La Angostura

Subcuenca	Área	Perímetro	Centroide			Índice de Gravelius
			X	Y	Z	
Loma Negra	3 663 km²	614 km	419 451 m	6 132 822 m	3 211 msnm	2.86
La Angostura	3 930 km²	787 km	423 618 m	6 130 994 m	3 140 msnm	3.54

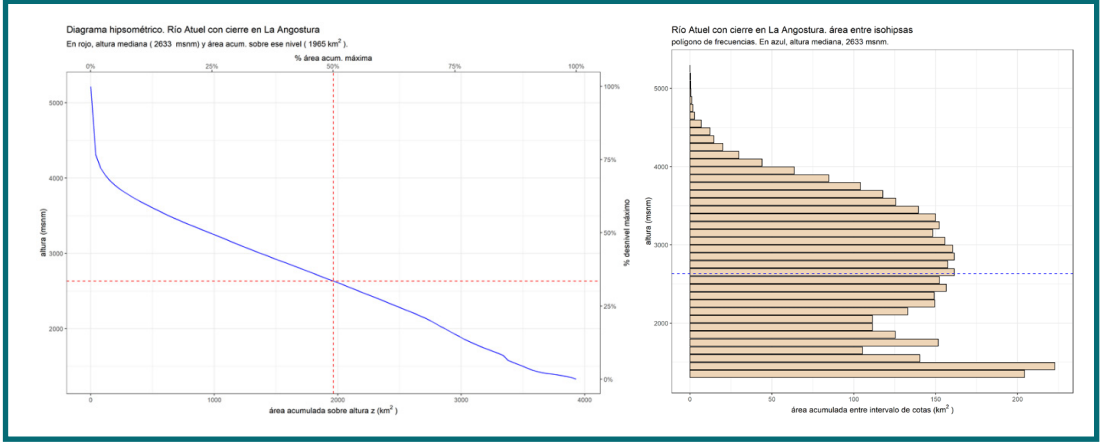
7.6.6 Alta Cuenca con Cierre en Loma Negra

Cuadro 7.13 Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias de la Subcuenca Baja (entre L. Negra y La Angostura)



7.6.7 Alta Cuenca con Cierre en La Angostura

Cuadro 7.14 Diagrama hipsométrico y polígono de frecuencias de la Cuenca del río Atuel con cierre en La Angostura



Fuente: Elaboración propia

7.6.8 Resumen de los parámetros morfométricos de las cuencas

Cuadro 7.15 Parámetros morfométricos de las distintas subcuencas analizadas.

Concepto	Subcuenca Rº Salado con cierre en Cañada Ancha	Subcuenca Rº Atuel con cierre en Puente Sosneado	Subcuenca Rº Atuel entre C. Ancha y P. Sosneado y Loma Negra
Altura mínima (msnm)	1746	1625	1382
Altura máxima (msnm)	4342	5215	3278
Desnivel máximo (m)	2596	3590	1896
Área máxima (km²)	665	2358	641
Altura media (m)	2729	2981	1712
Altura mediana (msnm)	2700	2993	1645
Área sobre altura mediana (km²)	339	1202	327
Área bajo curva (adim.)	0.379	0.378	0.174
Longitud de la cuenca (km)	38.3	95.1	67.7
Perímetro (km)	180.3	396.7	276.7
Ancho de la cuenca (km) B=A/L	17.4	24.8	9.5
Radio eq. igual área (km)	14.5	27.4	14.3
Factor de forma Kf= A/L²	0.45	0.26	0.14
Índice de Gravelius Kc=P/(2ϖReq)	1.98	2.3	3.08
Razón de elongación Re=2Req/ L=1.1284√A/L	0.76	0.58	0.42
Índice hipsométrico altitudinal	0.38	0.38	0.17
Pendiente media del cauce ppal. (%)	7%	4%	3%

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.15 **(cont): Parámetros morfométricos de las distintas subcuencas analizadas.**

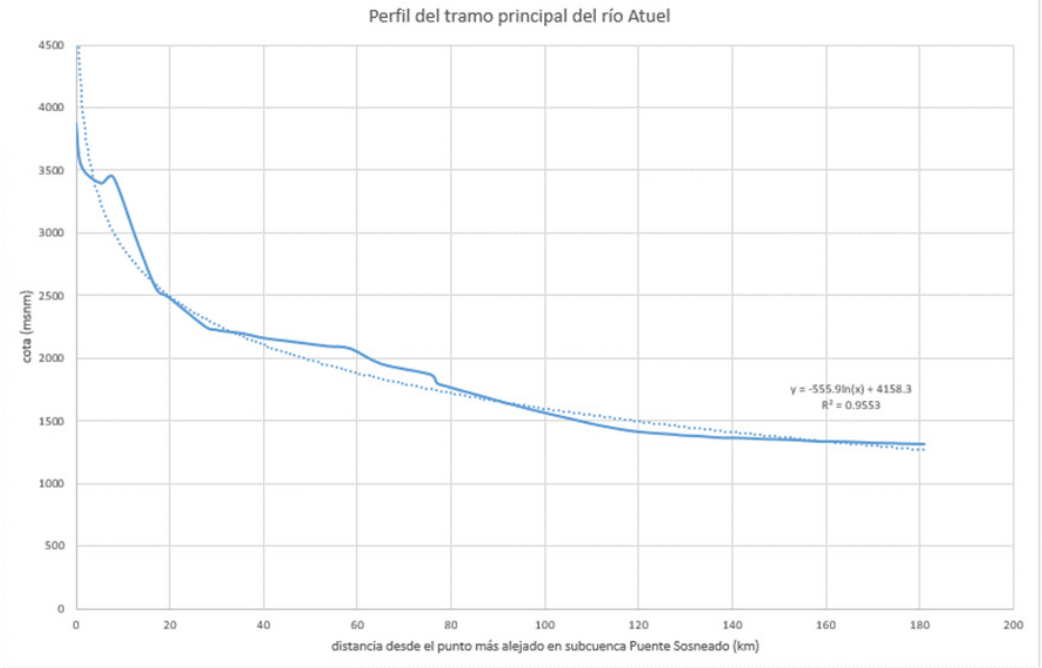
concepto	Subcuenca Rº Atuel entre Loma Negra y La Angostura	Subcuenca Rº Atuel con cierre en Loma Negra	Subcuenca Rº Atuel con cierre en la Angostura
Altura mínima (msnm)	1332	1382	1332
Altura máxima (msnm)	1600	5215	5215
Desnivel máximo (m)	268	3833	3883
Área máxima (km²)	267	3663	3930
Altura media (m)	1397	2713	2624
Altura mediana (msnm)	1385	2716	2633
Área sobre altura mediana (km²)	136	1868	2004
Área bajo curva (adim.)	0.241	0.348	0.333
Longitud de la cuenca (km)	69.1	141.9	177.8
Perímetro (km)	267.2	613.8	786.7
Ancho de la cuenca (km) B=A/L	3.9	25.8	22.1
Radio eq. igual área (km)	9.2	34.1	35.4
Factor de forma Kf= A/L²	0.06	0.18	0.12
Índice de Gravelius Kc=P/(2ϖReq)	4.62	2.86	3.54
Razón de elongación Re=2Req/ L=1.1284√A/L	0.27	0.48	0.4
Índice hipsométrico altitudinal	0.24	0.35	0.33
Pendiente media del cauce ppal. (%)	0.4%	2.7%	2.2%

Fuente: Elaboración propia

7.6.9 Perfil longitudinal de la cuenca

El Cuadro 7.16 muestra un perfil longitudinal trazado desde la zona de la Laguna del Atuel, al pie del volcán Overo, en la subcuenca Superior del río Atuel, hasta La Angostura.

Cuadro 7.16 **Perfil Longitudinal de La cuenca entre Laguna Atuel y La Angostura**



Fuente: Elaboración propia

7.6.10 Curvas características

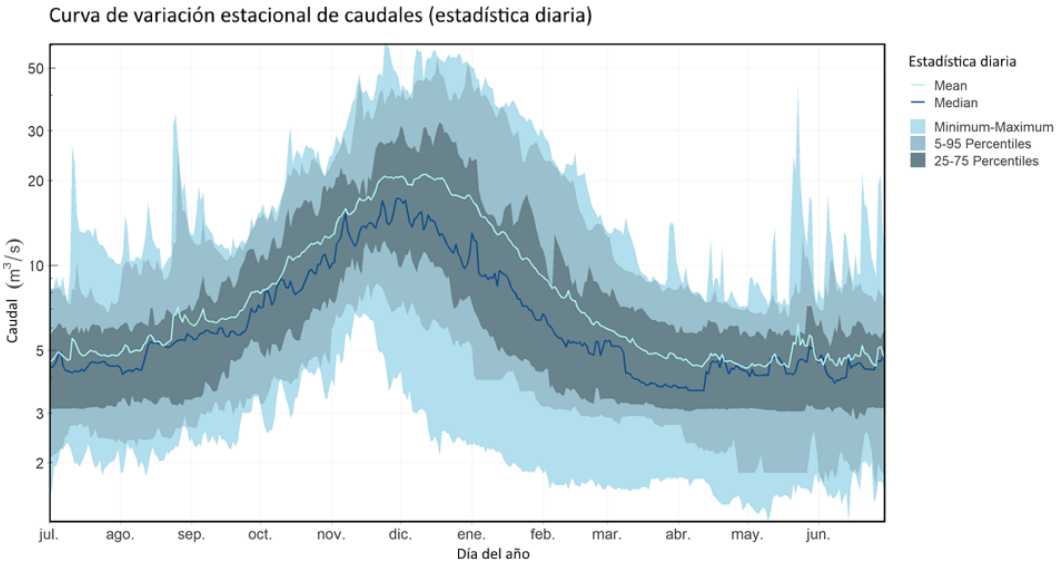
Para las subcuencas citadas, se adjuntan las curvas de variación estacional y curvas de caudales clasificados (Cuadros 7.17; 7.18; 7.19 y 7.20).

La curva de variación estacional describe cómo varía el caudal promedio a lo largo del año, reflejando el comportamiento hidrológico típico por estaciones o meses. Facilitan la determinación de períodos de aguas altas y bajas, y entre sus aplicaciones, las más importantes:

1. Planificación de uso del agua.
2. Gestión de embalses.
3. Estudios de riego.
4. Análisis de impactos climáticos y antrópicos.

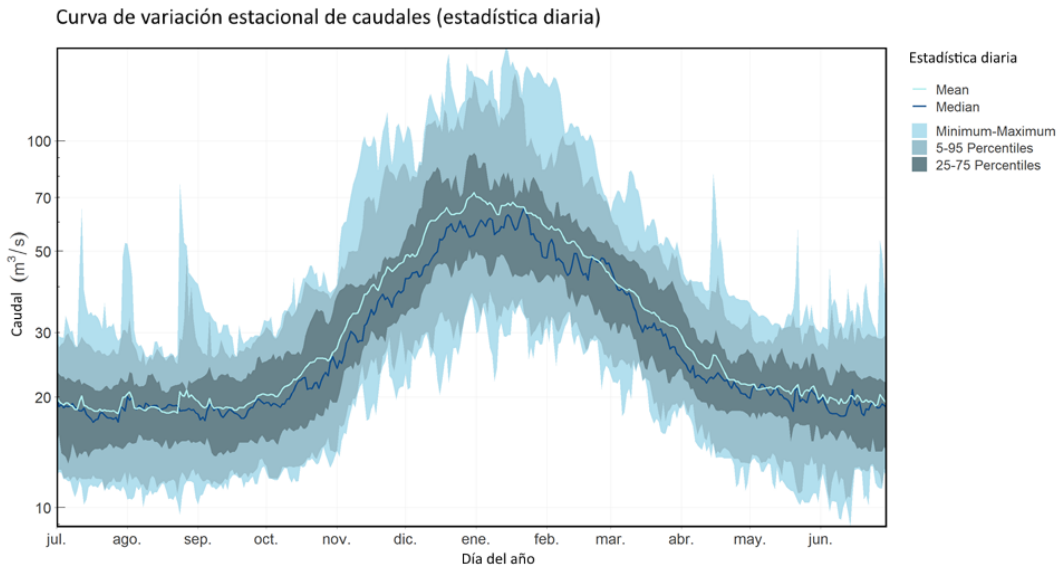
En relación con la modelación, podremos distinguir en ella aquellos procesos que parecen ligados a fenómenos pluviales o deslizamientos de laderas, que no quedarán representados en un modelo nival en el primer caso, o quedarán absolutamente fuera del alcance de este si se tratara de procesos de origen geológico, o requerirán un paso de tiempo de modelación adecuado a las tormentas convectivas de Mendoza.

Cuadro 7.17 Variación estacional de Caudales, subcuenca Cañada Ancha



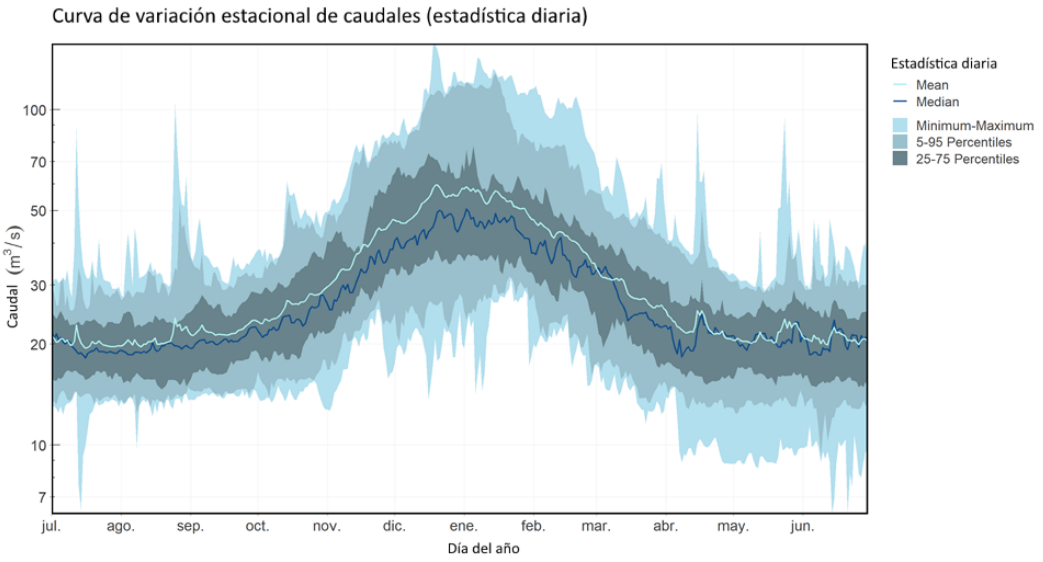
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.18 Variación estacional de caudales en Puente Sosneado



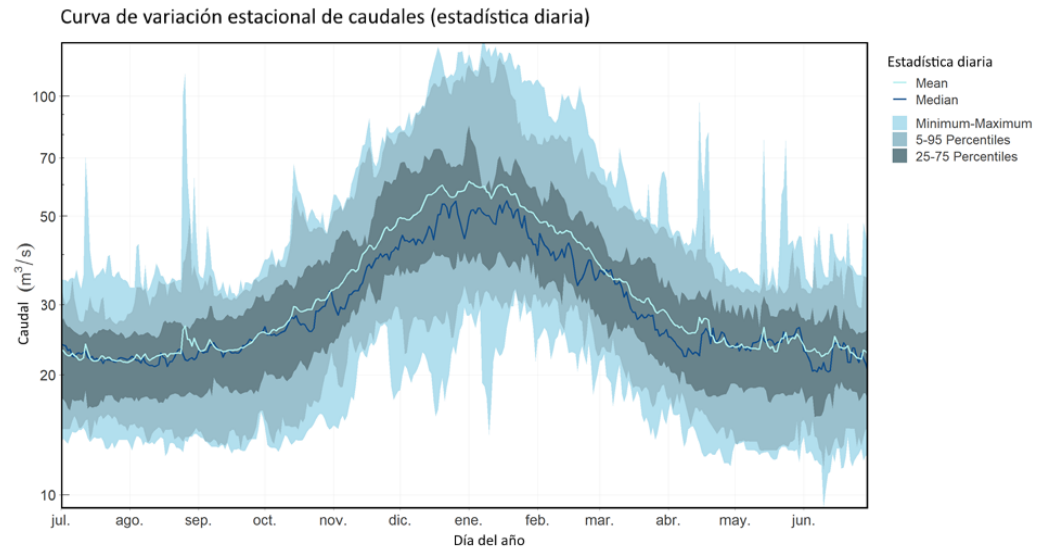
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.19 Variación estacional de caudales en Loma Negra



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.20 Variación estacional de caudales en La Angostura



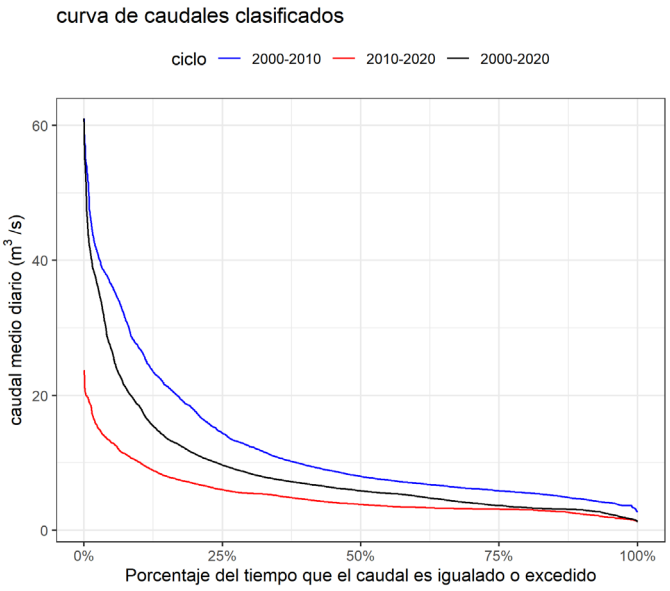
Fuente: Elaboración propia

La curva de caudales clasificados (Cuadros 7.21; 7.22; 7.23 y 7.24) representa la frecuencia con la que determinados caudales son igualados o superados durante un período de registro. Entre sus aplicaciones, se destacan:

- Estudios de aprovechamiento hidroeléctrico.
- Análisis de disponibilidad hídrica.
- Definición de caudales ecológicos.

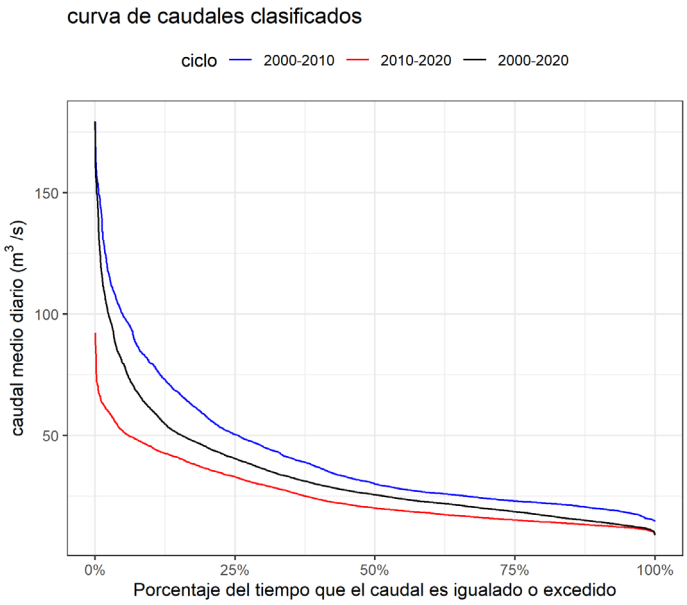
Permiten además comparar los resultados de una modelación con la realidad a una escala mayor que las métricas de bondad de ajuste.

Cuadro 7.21 **Curva de caudales clasificados para los períodos 2000-2010, 2010-2020, y 2000-2020 en Cañada Ancha**



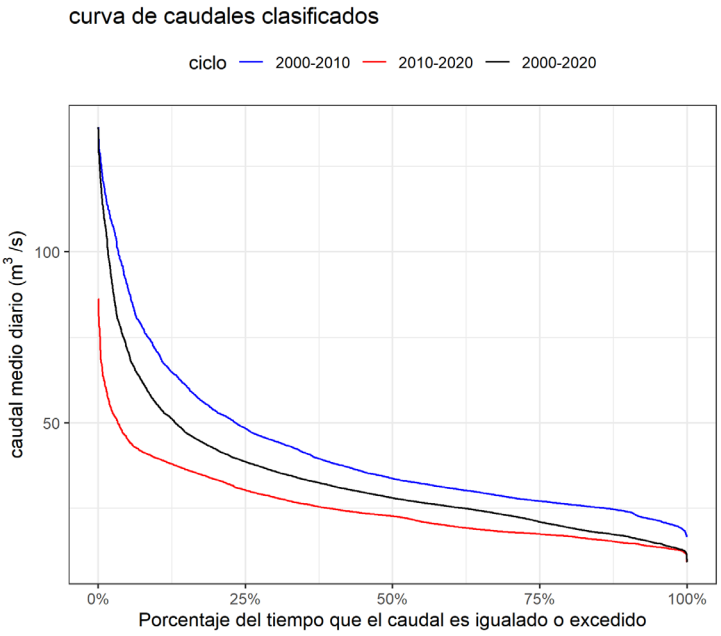
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.22 Caudales clasificados para los períodos 2000-2010, 2010-2020, y 2000-2020 en Puente Sosneado



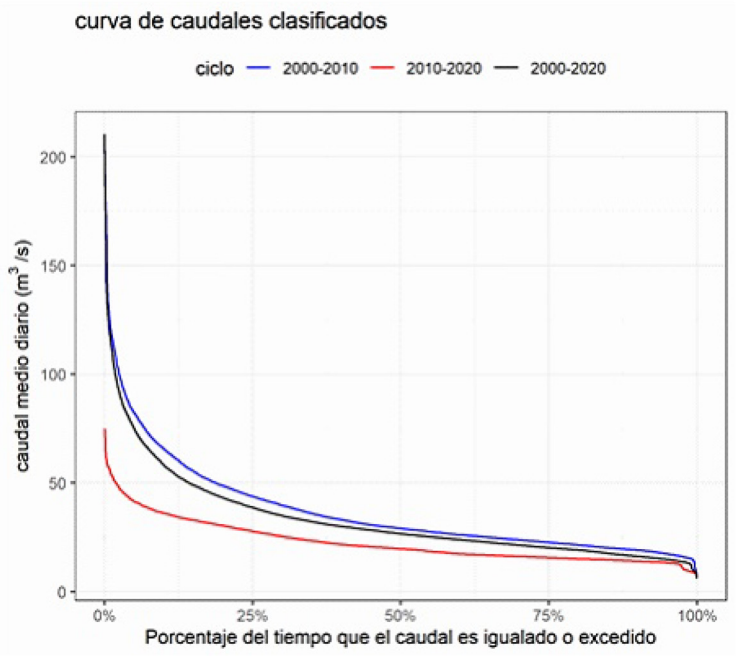
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.23 Caudales clasificados para los períodos 2000-2010, 2010-2020, y 2000-2020 en La Angostura



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7.24 **Caudales clasificados para los períodos 2000-2010, 2010-2020, y 2000-2020 en Loma Negra**



Fuente:

Elaboración propia

7.7 CONCLUSIONES

El análisis morfométrico detallado de la cuenca del río Atuel permite identificar zonas con dinámicas hidrológicas contrastantes: áreas de infiltración significativa, sectores de erosión activa y zonas de fuerte influencia glaciar. La división en subcuencas proporciona una base sólida para futuros modelos hidrológicos y balances hídricos regionales.

7.8 BIBLIOGRAFÍA

(CREALP), C. d. (s.f.). *RS MINERVE Technical Manual*.

Chow, M. &. (s.f.). Applied Hydrology.

Dingman, S. L. (s.f.). *Physical Hydrology (3rd ed.)*.

Hydrological, S. (. (s.f.). HBV Light – User Manual.

IANIGLA. (s.f.). *Atlas Argentino de Glaciares*.

Inchauspe, M. M. (s.f.). *Geografía de Mendoza*.

Journal of Hydrology, 2.–4. 2.–2. (s.f.). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model.

Publications, W. R. (s.f.). *Computer Models of Watershed Hydrology*.

Sandra del Águila, A. M. (s.f.). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica.

Trujillo, A. R. (s.f.). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*.

8 LA LÍNEA DE RIBERA: FUNDAMENTOS TÉCNICO-JURÍDICOS PARA LA GESTIÓN HÍDRICA

Ing. Esp. Rubén Villodas[11] - Dr. Mauricio Pinto[12]

8.1 RESUMEN

La determinación de la línea de ribera constituye uno de los problemas más relevantes y complejos de la gestión hídrica y territorial, porque materializa el límite entre el dominio público hidráulico (cauce, lecho y playas) y el dominio privado ribereño.

No se trata de una simple traza cartográfica ya que su fijación exige traducir un hecho hidrológico dinámico en una definición jurídica robusta, donde la precisión técnica condiciona directamente la seguridad jurídica, el ordenamiento del territorio y la prevención de conflictos dominiales y ambientales.

El capítulo analiza la evolución normativa argentina desde criterios descriptivos ("más altas aguas en su estado normal") hasta el enfoque actual del Código Civil y Comercial de la Nación, que define el río y su cauce por la línea de ribera fijada mediante el promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO).

Sobre esa base, se explica la noción de "creciente de diseño" y se discute la relación entre

11 Ingeniero civil, Especialista en Ingeniería Ambiental, Director de Gestión Hídrica del Departamento General de Irrigación y Profesor Titular de Hidrología e Hidrología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

12 Abogado, Doctor en Derecho. Máster en Derecho Ambiental. Diplomado en Estudios Avanzados en Propiedades Públicas y Medio Ambiente. Profesor de Derecho Ambiental e Investigador en las Universidades del Aconcagua y Nacional de Cuyo.

PMCO y la crecida asociada a un período de retorno cercano a 2 años (TR2), vinculada en hidrología fluvial y geomorfología al caudal formador del cauce (bankfull). Se destaca que, en series asimétricas o con alta variabilidad, media y mediana pueden diferir de modo significativo, por lo que la determinación debe sostener trazabilidad estadística y validación empírica.

Desde el punto de vista técnico-operativo, se desarrolla el proceso interdisciplinario para determinar, delimitar y demarcar la línea: levantamientos topográficos de alta precisión (GNSS/RTK, drones, redes geodésicas oficiales), integración en SIG, modelación hidráulica (frecuentemente 1D) para transformar caudales en cotas de lámina, y verificación geomorfológica para asegurar coherencia con evidencias persistentes del terreno, especialmente en ríos trenzados o divagantes.

Finalmente, se enfatiza la calidad cartográfica (exactitud posicional, completitud, consistencia lógica y linaje) como condición de validez técnica y legal, y se presenta el estudio de caso del río Mendoza (sectores regulados, no regulados y divagantes), mostrando la movilidad temporal del límite y la necesidad de revisiones metodológicamente auditables.

8.2 INTRODUCCIÓN

En otro de los capítulos de esta obra[13] se ha referido a la necesaria interacción disciplinar en torno a la gestión del agua, y los retos que de ella se derivan. En línea con ese análisis puede afirmarse que la determinación de la línea de ribera constituye uno de los desafíos multi, inter e incluso transdisciplinarios más significativos para la gestión hídrica y territorial actual.

Dicha línea representa el límite que permite deslindar los cauces pertenecientes al dominio público hídrico con respecto a los predios pertenecientes al dominio privado de los ribereños, con lo que en la misma confluyen aspectos propios de la configuración hidráulica de los cauces con otros que hace a la configuración jurídica de los derechos de dominio sobre el cauce y los terrenos adyacentes.

Esa frontera entre ambos dominios no es simplemente una marca geográfica o cartográfica, sino que su establecimiento requiere de un estudio donde el régimen legal y la técnica deben traducirse en una definición jurídica robusta, en la que la precisión del cálculo hidrológico determina directamente la seguridad jurídica del cauce y de los predios ribereños, con incidencia no solo en la gestión de tales áreas, sino también en otros aspectos diversos, como la eficacia de las mensuras catastrales.

El concepto es fundamentalmente declarativo y dinámico; esto significa que los actos administrativos que determinan la línea y aprueban su demarcación no transfieren la

13 Ver el capítulo "EL AFORO DE LOS DERECHOS DE AGUA: PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE VOLÚMENES".

propiedad, sino que se limita a constatar técnicamente una situación hidrológica preexistente que conCuadro el límite legal del dominio público hidráulico, permitiendo su preservación y gestión, así como gestionar los riesgos ambientales en áreas ribereñas.

Para comprender la magnitud de este concepto, se debe manejar con solvencia distintos aspectos técnicos y legales como son:

- √ la distinción entre el dominio público -en el caso el hidráulico- y el dominio privado ribereño según la legislación argentina;
- √ las características particularidades que presenta el límite de ambos dominios;
- √ la evolución normativa que rige esta determinación, la que ha transitado por tres hitos fundamentales que reflejan el paso de criterios meramente descriptivos hacia parámetros estadísticos de alta complejidad;
- √ el proceso técnico multidisciplinario, para establecer el deslinde del dominio público hidráulico, que se divide en dos fases: la determinación de la línea de ribera, por un lado, y la delimitación y demarcación de la misma;
- √ la determinación es el proceso técnico-legal donde se combinan estudios legales, topográficos, hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos para calcular el caudal o "crecida de diseño" y las cotas correspondientes, según el criterio de caudales fijado legalmente;
- √ la delimitación y demarcación consiste en el trazado material de la línea en el terreno y su incorporación a la planimetría hidrológica y catastral, concretándose el deslinde administrativo del dominio público hidráulico.

El proceso para establecer la línea de ribera es una labor técnica de alta precisión, que requiere una coordinación interdisciplinaria entre la topografía, la hidrología, la hidráulica, la geomorfología y el derecho. Solo mediante la integración de modelos matemáticos calibrados, una lectura correcta del terreno y el respeto por el marco legal vigente, se puede garantizar que el límite entre lo público y lo privado sea un reflejo fiel y eficaz de la realidad fluvial.

La omisión en identificar la línea de ribera no es sólo un simple vacío técnico; constituye una falencia estructural que afecta múltiples dimensiones de la gestión territorial y del recurso hídrico. La línea de ribera no es una Cuadro arbitraria, sino un instrumento legal y técnico que traza la frontera entre lo que es cauce y lo que no lo es, delimitando el lecho, la playa y la ribera de un curso o cuerpo de agua.

Su ausencia o indefinición pone en juego la seguridad jurídica de los inmuebles ribereños, pero en especial de los cauces públicos, favoreciendo ocupaciones irregulares, generando conflictos entre el derecho de dominio y el interés público y, en última instancia, debilitando la capacidad del Estado para ejercer su poder de policía y de planificación sobre el agua y el territorio. Esta ausencia también convierte la función preventiva del

derecho ambiental en una mera declaración programática y deja al territorio a merced de la especulación privada.

La indefinición también repercute en la gestión de riesgos hídricos. Los cursos de agua son sistemas dinámicos cuya morfología y caudales cambian en respuesta al clima y a las intervenciones humanas; sin un límite definido en forma concreta, los modelos hidrológicos y territoriales carecen de la referencia de la crecida de diseño; se construyen obras en zonas habitualmente anegables; proliferan asentamientos precarios expuestos a crecidas; la presión erosiva o la sedimentación pueden destruir defensas, generar litigios por deslinde y agravar los daños aguas abajo.

En términos sociales, la carencia de demarcación vulnera derechos fundamentales, ya que distintas actividades náuticas o recreativas se ven dificultadas por obras y cercamientos ilegales que avanzan hacia los cauces; la falta de límites claros entre los dominios público y privado impide que la comunidad disfrute de los bienes naturales y genera conflictos socio–ambientales.

Por el contrario, la evidencia muestra que cuando la línea de ribera está definida y registrada catastralmente con la intervención del Estado, se crea un marco de certidumbre que protege el patrimonio público y privado y facilita la gobernanza, imponiéndose un límite a la presión antrópica sobre los cursos de agua, pero también una certeza que facilita la inversión en predios privados.

La identificación de la línea de ribera asegura el espacio para una adecuada escorrentía fluvial y para la conservación de humedales que proveen servicios ecosistémicos irremplazables, permitiendo ordenar el territorio y zonificar usos del suelo según su potencial impacto sobre los recursos hídricos.

Con base en la línea de ribera se pueden fijar, además, límites y restricciones en las propiedades laterales al cauce para asegurar el libre acceso público y el mantenimiento de obras hidráulicas. Pero también sirve de base a otras delimitaciones en las riberas con la finalidad de que el territorio se ordene según la peligrosidad vinculada a inundaciones y avenidas aluvionales, pudiéndose diseñar vías de evacuación y soluciones basadas en la naturaleza como corredores verdes que atemperen el impacto de las crecidas.

A nivel administrativo, la inscripción del deslinde en el registro catastral constituye el estado parcelario con límites definidos y evita que los derechos reales se vean cuestionados, potenciando la seguridad jurídica y certeza que favorece el tráfico inmobiliario.

Económicamente, puede evitar pérdidas millonarias asociadas a la construcción en zonas inundables, al litigio por usurpaciones y a la degradación ambiental; a nivel social, reduce las desigualdades al impedir asentamientos en zonas de riesgo y definir las costas como espacios de uso público y recreativo.

En suma, la determinación de la línea de ribera es una medida estratégica que conjuga ciencia, derecho y política para regular la relación entre sociedad y naturaleza. Su omi-

sión prolongada no solo debilita la autoridad del Estado, sino que favorece el desorden territorial, incrementa la vulnerabilidad ante desastres y conduce a la pérdida de bienes comunes. Por el contrario, una línea de ribera bien demarcada actúa como eje estructurante para la planificación urbana y rural, para la gestión integrada del agua y para la preservación de ecosistemas, aportando beneficios legales, económicos, sociales y ambientales que superan con creces el esfuerzo técnico y administrativo que requiere su implementación.

En este capítulo se analizarán los principales aspectos teóricos y prácticos en torno a la determinación de la línea de ribera, y aunque el tema es abordado con una perspectiva general extensible a otros ámbitos, se pondrá énfasis en el caso de la provincia de Mendoza.

8.3 LÍNEA DE RIBERA, DOMINIO PÚBLICO HIDRÁULICO Y PROPIEDADES RIBEREÑAS

8.3.1 Aspectos generales

De acuerdo con la legislación vigente, corresponden al dominio público los ríos y lagos conformados por el agua, las playas y el lecho, delimitado por la línea de ribera (arts. 235.c y 1960 Código Civil y Comercial -CCyC-; arts. 40, 42 y 43 Ley de Aguas de Mendoza -LA-). La línea de ribera es aquella línea imaginaria que marca el límite territorial entre el cauce o lecho de dominio público y las propiedades ribereñas al mismo (Castello, 1921, p. 90; Pinto, Andino y Rogero, 2019).

De este modo, de un lado de la línea de ribera se encuentra el cauce o lecho del río o lago, que por pertenecer al dominio público resulta inenajenable, inembargable e imprescriptible (art. 237 CCyC); y del otro las propiedades ribereñas, generalmente de dominio privado.

Es decir, la fijación de la línea de ribera refiere a la determinación material del alcance o extensión de predios que se encuentran a ambos lados de la misma, así como sus naturaleza y titularidades dominiales; con ella se especifica hasta dónde llega el dominio público de titularidad estatal, y dónde comienzan los predios ribereños que se encuentran a continuación del cauce. Tal deslinde no determina otros aspectos que puedan requerir otro tipo de intervención policial -según se analizará *infra*- sobre la ordenación del territorio o la defensa de la seguridad de las personas y los bienes en el caso de crecidas extraordinarias que impliquen el desborde del río fuera de su cauce.

Mientras que el deslinde de bienes del dominio privado es una instancia privada que -en caso de incertidumbre sobre los mismos- se realiza a través de la acción judicial prevista en los arts. 2266 CCyC y 312 del Código Procesal Civil, Comercial y Tributario Mendoza, "el deslinde de los bienes de dominio público corresponde a la jurisdicción administra-

tiva" (art. 2267 CCyC), y consiguientemente conlleva la necesidad de un procedimiento administrativo susceptible de ser revisado mediante la acción procesal administrativa que regula la Ley 3918.

En la provincia de Mendoza, la autoridad competente para implementar el deslinde del dominio público hidráulico es -en forma exclusiva- el Departamento General de Irrigación (DGI) por imperio del art. 188 de la Constitución de Mendoza, norma que estipula "una cláusula abierta de competencia administrativa, en el sentido de que toda la competencia de este tipo es titularizada por el Departamento General de Irrigación; y por otro lado, marca un límite infranqueable entre la materia administrativa y todo aquello que es de competencia de la jurisdicción" (SCJM, 1989a).

Debe resaltarse que dicha competencia es en relación con todo cauce natural y sus riberas (art. 6 LA), es decir tanto en los cursos permanentes como los temporarios o aluvionales, no debiendo confundirse la policía hídrica que corresponde a dicho ente para deslindar la línea de ribera, con otras funciones policiales sobre el ordenamiento del territorio y la construcción de infraestructura vinculadas a zonas inundables.

La potestad de deslindar las riberas es programática, de modo que el momento en que se ejecute la línea de ribera en cada sector de un cauce depende de un análisis de la necesidad, oportunidad y conveniencia que debe llevar adelante la autoridad administrativa competente en el marco de las disponibilidades presupuestarias. La falta de deslinde administrativo del cauce público genera -intertanto se concrete- una indeterminación de la actual línea de ribera, pero no su inexistencia, aspecto que se analiza *infra* con mayor detalle al tratar los aspectos propios de los procedimientos de levantamiento parcelario de los predios ribereños.

Por otro lado, la línea de ribera se caracteriza por ser dinámica, pudiendo variar en el tiempo. Esto es así debido a que los predios ribereños acrecientan y merman su superficie en función de la variabilidad geográfica que naturalmente presenta el escurrimiento de las aguas, de modo que la ribera no resulta un hecho físico estático sino dinámico, tal cual surge de la nota al art. 2572 del Código velezano[14], régimen que -en concordancia con el art. 2573 del mismo cuerpo- regulaba el acrecentamiento del predio ribereño por aluvión. Esté régimen perdura en el actual Código Civil y Comercial, donde en el art. 1959 se contempla que el régimen del aluvión se aplica a los acrecentamientos producidos por el retiro natural de las aguas y por el abandono de su cauce.

De tal modo, se ha resaltado que la delimitación de una ribera -y sus eventuales revisiones en el marco del dinamismo del cauce- no resulta constitutiva del dominio público, sino que es declarativa del mismo a partir de la situación que surge de un hecho natural, presentando efectos jurídicos se proyectan *ex tunc* (Spota, 1941, p. 25; Marienhoff, 1971,

14 Expresa el codificador en dicha nota que: "El lecho del agua corriente no tiene un límite invariable. Este límite, por el contrario, es movible; avanza o se retira. Los terrenos, pues, que lindan con los ríos, pueden unas veces perder, y es justo que otras puedan por las mismas causas, ganar para conservar su límite señalado."

p. 253; Volonté, 2014; Zavala, 2024), y de allí que las propiedades ribereñas resultan condicionadas en su reconocimiento, extensión y límite por tal hecho hidrológico que la autoridad administrativa oportunamente debe establecer al delimitar el cauce (STJRN, 2015); siendo esto acorde a la doctrina de la Corte nacional que ha entendido que por la naturaleza declarativa del deslinde, el dominio público hidráulico que surge del mismo es oponible incluso frente a fracciones de terrenos que oportunamente se registraron y tributaron como privados (CSJN, 1959).

8.3.2 Evolución normativa de la línea de ribera

Los parámetros legales para determinar la línea de ribera presentan una evolución normativa en Argentina que ha transitado por tres hitos fundamentales que reflejan el paso de criterios principalmente descriptivos hacia parámetros estadísticos hidrológicos más complejos.

Desde un inicio, el régimen civil adoptó en el principio del *plenissimum flumen*, definiendo la ribera en base a las más altas aguas en su estado normal. Y aunque la reforma de 1968 introdujo una referencia parcial a las crecidas medias, lo hizo sin abandonar dicho criterio. La reforma de 2015 se ha mantenido en la misma línea, sistematizando el límite del dominio público hidráulico a partir de las máximas crecidas ordinarias, alineando el derecho con la hidrología de extremos y exigiendo una trazabilidad metodológica rigurosa.

Más allá de que todas las normas se alinean en el mismo concepto del *plenissimum flumen,* a continuación, se detallan las particularidades y evolución que implicó cada uno de esos hitos.

8.3.2.1 El Código Civil de Vélez Sarsfield (1871-1968)

El Código Civil de Vélez (Ley 340) estipuló en su art. 2340 que los ríos y sus cauces eran de dominio público (inc. 3), al igual que las playas del mar y las playas de los ríos navegables en cuanto su uso sea necesario para la navegación (inc. 4). En relación con el límite de tales bienes refirió como playas del mar a "la extensión de tierra que las olas bañan y desocupan en las más altas mareas, y no en ocasiones extraordinarias de tempestades".

En cuanto a los cauces, estableció en forma específica que los límites del lecho de los ríos estaban determinados "por la línea a que llegan las más altas aguas en su estado normal" (art. 2577).

De este modo, el régimen de Vélez toma el criterio -de raíz romanista- del *plenissimum flumen*: ribera es la que contiene al río en su mayor altura normal, excluyendo eventos extraordinarios; concepto que hidrológicamente se vincula al nivel de los ríos denominado *bankfull* (nivel en el que el cauce está lleno, pero no desbordado).

Este régimen permite una solución basada en una hidrología empírica, a partir de una observación de campo que permita identificar evidencias geomorfológicas sobre el rango de niveles que actúan con frecuencia suficiente como para controlar la geomorfología del cauce, permitiendo excluir crecientes excepcionales que no representan el régimen que habitualmente "modela" el borde del lecho; y en evidencias materiales como marcas de erosión, depósitos recurrentes, cambios de vegetación, terrazas bajas, evidencia de uso y frecuencia de anegamiento.

Este tipo de relevamientos permite implementar dos sistemas de demarcación: un sistema de desbordamiento general, que intenta seguir el contorno alcanzado por el agua al nivel adoptado, y un sistema poligonal, que une mediante segmentos los puntos característicos alcanzados por ese nivel. La precisión depende de la escala del relevamiento, de la complejidad del borde inundable y de la densidad de puntos de control.

Sin embargo, la referencia a las "aguas en su estado normal" también habilitaba a un abordaje estadístico, a partir de la definición de la recurrencia propia de las crecidas normales, asociándose estadísticamente éstas a un tiempo de recurrencia -o de retorno- de entre 1.50 y 2.33 años. O sea, en forma práctica, un evento que se espera que sea igualado o superado, en promedio, una vez cada 2 años (TR2).

8.3.2.2 La reforma introducida por la Ley 17.711 (1968-2015)

La Ley 17.711 (1968) reformó el art. 2340 del Código Civil e introdujo una referencia explícita a las "crecidas medias ordinarias". El inciso 4 de tal precepto pasó a incluir como bienes públicos a "Las playas del mar y las riberas internas de los ríos, entendiéndose por tales la extensión de tierra que las aguas bañan o desocupan durante las altas mareas normales o las crecidas medias ordinarias".

Sin embargo, la Ley 17.711 no modificó el art. 2577 del mismo cuerpo, manteniéndose así el criterio de "más altas aguas en su estado normal" para definir el límite de los ríos. La doctrina mayoritaria criticó esta situación, afirmándose que era inconcebible que en el Código se establecieran dos criterios diferentes y opuestos entre sí, ya que el nivel de las más altas crecidas normales no concuerda con el de las crecidas medias ordinarias (Marienhoff, 1970; Allende, 1971, p. 194; Llambías y Alterini, 1981, p. 51 y 366; López, 1987).

Explica Cano al respecto que el art. 2340 inc. 4 reformado implicó adoptar un criterio restrictivo de la magnitud, siendo que el caudal dado por las crecidas medias ordinarias es menor que el de las más altas aguas en su estado normal; ya que, si se analizan las dos terminologías, la palabra "media" se refiere a promedios de caudales, los que son menores que los caudales máximos o "más altas aguas" (1988, vol. I, p. IV-22).

Sin embargo, aunque la vigencia de ambos preceptos generó una tensión interpretativa y es muestra de una deficiente técnica legislativa, en realidad no existía una verdadera

incompatibilidad entre ellos si se consideraba el Código en forma integral. Como pronto observó la doctrina, con la reforma de 1968 se contemplaron dos situaciones que integraban el cauce dentro del dominio público hidráulico, sin que una excluya a la otra: a) las playas o ribera interna del cauce, que abarca la extensión de tierra que las aguas bañan o desocupan hasta las crecidas medias ordinarias -art. 2340 inc. 3-; y b) el lecho que se extiende hasta las más altas aguas en su estado normal o plenissimun flumen -art. 2577- (Garrido y Andorno, 1972, T° I, p. 94 y 97, y T° II, p. 208 y 209; López, 1975, p. 156; López, 1983).

En definitiva, como observó Cano, en esta etapa "tanto la ribera interna como el lecho pertenecen al dominio público", y el cauce siguió estando definido por las más altas aguas en su estado normal (1988, vol. II, p. IV-22).

8.3.2.3 Código Civil y Comercial de la Nación (desde 2015)

El actual Código Civil y Comercial (Ley 26994) incorpora la línea de ribera como elemento definitorio del propio "río" y "lago o laguna". El art. 235, al regular a los cauces como bienes del dominio público, dispone que se entiende por río "el agua, las playas y el lecho por donde corre, delimitado por la línea de ribera que fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias". El mismo criterio es reiterado para definir el límite del cauce del río en materia de aluvión: el art. 1960 indica que el cauce se determina por la línea de ribera que fija el promedio de las máximas crecidas ordinarias.

De esta forma, se supera la discordancia terminológica y de criterios que existía entre los arts. 2340 y 2577 CC, unificando en todo el articulado en las máximas crecidas ordinarias como definidoras de los límites del cauce, consolidándose más allá de cualquier debate el criterio del *plenissimum flumen* (Pinto y Martín, 2015).

En cambio, con respecto al régimen previo, se introduce una sutil pero importante diferencia: si bien tanto las más altas aguas en su estado normal como las máximas crecidas ordinarias explicitan la lógica de valores extremos ordinarios o normales, de caudales máximos anuales, la nueva normativa explicita un requerimiento metodológico para su determinación: debe concretarse mediante el "promedio de las máximas crecidas ordinarias", lo que disminuye la discrecionalidad técnica y facilita la conexión con prácticas hidrológicas estándar (series de máximos, depuración de *outliers*, trazabilidad del cálculo).

8.3.3 Línea de ribera y áreas ribereñas

8.3.3.1 Límites y restricciones para el uso y preservación del agua

Determinar y demarcar la línea de ribera sólo implica diferenciar con certeza hasta dónde llega el cauce de dominio público hidráulico que se encuentra bajo administración públi-

ca, y donde comienza la propiedad ribereña lateral al mismo.

La línea de ribera no habilita por sí las acciones y medidas que muchas veces son necesarias en las áreas ribereñas para la adecuada gestión hídrica. Dichas áreas por encima de la línea de ribera resultan de propiedad del titular de las mismas, quien en principio tiene el derecho exclusivo a usar, gozar y disponer de su dominio, pudiendo excluir a terceros del mismo (arts. 1941, 1943 y 1944 CCyC).

Sin embargo, ningún derecho es absoluto, sino que deben ser ejercidos conforme las leyes que los regulan (arts. 14 y 28 CN). Y las regulaciones contemplan diversas medidas jurídico-legales concebidas para que el derecho de propiedad individual armonice con los requerimientos del interés público propio de la gestión del agua, como son las restricciones y servidumbres administrativas vinculadas al uso y preservación del agua (Pinto, 2004).

Las restricciones son las condiciones legales que hacen al ejercicio normal u ordinario del derecho de propiedad, consistiendo en una mera tolerancia general que todo propietario debe soportar, y por ello gravan a todos y cada uno de los propietarios en igual medida e intensidad.

En Mendoza, por ejemplo, la Ley de Aguas y sus reglamentaciones establecen diversas restricciones vinculadas al uso y preservación del cauce y sus aguas que afectan a los predios ribereños. En este sentido, se resalta la obligación de todo propietario de dar aviso a la autoridad del agua de cualquier construcción defensiva que pretenda realizar dentro de su propiedad (art. 168), y pedir autorización si fuera a avanzar sobre el cauce (art. 170); no pudiendo realizar nada que altere o estorbe el descenso natural de las aguas que se produce desde predios superiores, ni gravar la situación de los predios inferiores con respecto a la aguas que descienden desde su propiedad (arts. 47, 48 y 50). También debe permitir el ingreso a través de su predio al personal responsable de la gestión del cauce cuando sea necesario para el ejercicio de sus labores (art. 80).

Reglamentariamente, la Resolución 778/96 HTA (t.o. Resolución 52/20 HTA), prohíbe la acumulación de sustancias no autorizadas, basura o residuos, escombros, desechos domésticos, químicos o industriales, o de cualquier otro material en áreas o zonas que pueda implicar un riesgo o peligro para el recurso hídrico; y regula la imposición de zonas o áreas de protección hídrica en el perímetro de los cursos naturales o artificiales de aguas, lagos, lagunas, diques y embalses o determinadas zonas de acuíferos subterráneos, a los efectos de la regulación de las actividades que allí se realicen y con el objetivo de evitar alteraciones o degradaciones de las aguas, y así procurar la protección y calidad de las mismas.

Más allá de las restricciones administrativas referidas, también cabe mencionar la restricción civil conocida como "camino de sirga", según estipula el art. 1974 CCyC. Esta restricción consiste en la obligación del dueño de un inmueble colindante con un cauce apto para el transporte por agua, de dejar libre una franja de terreno de quince metros de ancho en toda la extensión del curso, en la que no puede hacer ningún acto que menoscabe aquella la navegación.

Debe aclararse que la Corte nacional ha especificado que esta restricción solo es exigible con propósitos vinculados a la navegación y no otras actividades; y que tal navegación no refiere a una "navegabilidad de hecho", sino que el concepto legal de navegabilidad refiere a situaciones en las que existe un medio de transporte continuo, sea de personas o cosas, que responde a un interés general y a la idea económica del tráfico fluvial organizado, de modo que no debe considerarse navegable un curso de agua en el que solo es accidental y transitoria la presencia de una embarcación (CSJN, 2009).

Por otra parte, cuando es necesaria la construcción de una obra de infraestructura para extraer aguas de un cauce o desaguar en el mismo, el régimen contempla la posibilidad de imponer servidumbres de acueducto o desagüe. Las servidumbres resultan un derecho real sobre un inmueble ajeno en virtud del cual se puede usar del mismo, o ejercer ciertos derechos de disposición, o bien impedir que el propietario ejerza algunos de sus derechos de propiedad (Pinto, 2004).

La Ley de Aguas mendocina establece que toda heredad está sujeta a la servidumbre de acueducto en favor de otra heredad que carezca del agua necesaria para los usos otorgados, y para dar salida a las aguas sobrantes (arts. 59 y 60). La servidumbre implica una carga particular que recae sobre el predio afectado, y, por tanto -a diferencia de las restricciones- debe ser impuesta en forma expresa (art. 85) e indemnizada (arts. 69 y ss.).

8.3.3.2 Áreas inundables y obras de defensa

La determinación de la línea de ribera acorde a la regulación analizada no solo estipula hasta dónde llega el cauce, sino que además tiene significativa importancia en relación a las áreas ribereñas, ya que -conceptualmente- cuando se supera el caudal legalmente fijado como límite físico del cauce se produce un desborde, y consiguiente la inundación de los predios ribereños (Spota, 1941, ps. 205 y 219; Castello, 1921, p. 92).

De este modo, puede afirmarse que una vez establecida la línea de ribera las avenidas normales u ordinarias son aquellas en las que el escurrimiento se encuentra dentro de los límites del cauce; y resultan derrames extraordinarios o anormales cuando están por encima del límite de la línea de ribera.

Marienhoff (1971, p. 222) ha precisado que las inundaciones para nada influyen en la determinación del lecho de los cursos de agua, ya que cuando la legislación establece que los cauces están dados por el nivel de las crecidas ordinarias o normales, rechaza a las crecidas anormales o extraordinarias para fijar los mismos, y por ello el terreno que las aguas cubren a raíz de una inundación no forma parte del curso de agua ni tiene nada que ver con la línea de ribera.

Ahora bien, junto a la determinación de los caudales que la ley estipula para la línea de ribera es posible establecer otros caudales mayores y las áreas ribereñas que -estando por encima del promedio de las máximas crecidas ordinarias- serían susceptibles de

inundación. Pero este aspecto no debe ser confundido con la determinación de la línea de ribera, sino que hace referencia a aspectos propios de la gestión de riesgos hídricos.

Tal gestión ya no trata del cauce y sus aguas ordinarias, sino de la prevención de daños ante situaciones extraordinarias, de desborde de los ríos. Y en este punto debe aclararse que -frente al riesgo de inundación- la Ley de Aguas vigente ha contemplado la facultad del propietario ribereño de implementar sus defensas, con la sola restricción de avisar a la autoridad de aguas para que ésta pueda controlar policialmente que las obras no afecten el dominio público hidráulico; debiendo obtener autorización para toda obra defensiva que ocupe el referido dominio público (arts. 168/170).

Con ello, frente a crecidas extraordinarias que desborden el cauce, los responsables primarios e inmediatos en adoptar medidas preventivas son titular de las propiedades ribereñas, los que podrán efectuar u omitir -a su riesgo- las obras defensivas que estimen corresponder, sin que la delimitación de la ribera genere ninguna responsabilidad estatal al respecto.

Por otra parte, y en lo que hace a las políticas públicas de gestión de áreas inundables, el régimen legal ha desarrollado un esquema competencial completamente distinguible del propio de la gestión de los cauces y sus aguas, regulando un régimen específico sobre obras de defensa aluvional y de prevención de inundaciones.

Más concretamente, la Ley 2797 (modificada por Ley 3308) estipula como función de la Dirección de Hidráulica -dependencia del actual Ministerio de Ambiente y Energía del Poder Ejecutivo Provincial- la realización de estudios, proyectos y obras destinadas al encauzamiento de las aguas pluviales en defensa de las zonas rurales y urbanas de la Provincia y la conservación y mejoramiento de las obras existentes; y la Ley 7029 le confiere la competencia para determinar restricciones dominiales en franjas ribereñas en cauces aluvionales. Los Decretos 1782/61 y 752/97 detallan la labor de dicho organismo en relación al contralor de la seguridad de la población y obras de infraestructura ante aluviones, crecidas, inundaciones, etc.; y también la realización de los estudios, obras y actividades de conservación de las obras a su cargo.

Junto a ello, la Ley 1079 coloca explícitamente en cabeza de los municipios la adopción de medidas precaucionales y la construcción las obras necesarias para evitar inundaciones (arts. 75.10 y 79.3); potestades que deben coordinarse con las propias de la Dirección de Hidráulica que se refieren en el párrafo anterior. A ello se suma la potestad de planificar la ordenación del territorio municipal, estableciendo áreas y sub-áreas de alto riesgo natural, sus capacidades de carga demográfica y habitacional, así como las posibilidades de explotación económica y de crecimiento; indicando, en cada uno de los sectores delimitados, los tipos de uso expresamente prohibidos, restringidos y/o permitidos (art. 23.a y b Ley 8051).

Cabe aclarar, sin embargo, que la realización de dichas obras defensivas o el dictado de restricciones dominiales en cuanto al uso del territorio responde a una decisión discrecional de la autoridad competente, sin que exista una obligación de actuar expresa frente a cierta circunstancia; y por ello, tal como pretorianamente entendió la Corte provincial

(SCJM, 1989b) y hoy regula en el art. 8 de la Ley 8968 -de Responsabilidad Patrimonial del Estado-, ese deber indeterminado en principio no genera responsabilidades por omisión, salvo situaciones muy particulares que surgen de esa doctrina judicial y legal.

Más allá de todo ello, se considera oportuno y eficiente que exista una coordinación institucional entre la autoridad responsable del deslinde de ribera y las autoridades con competencias vinculadas a procesos de inundación, ya que en ocasión del deslinde del cauce pueden incluirse en los estudios técnicos las variables necesarias para determinar líneas de riesgo hídricos asociadas a diversas recurrencias de crecidas extraordinarias.

8.3.3.3 Interacción de la línea de ribera con la mensura de predios ribereños

El análisis de los aspectos propios de la planimetría u otros instrumentos catastrales del deslinde de los cauces requiere aclarar que, a diferencia de los bienes privados, los bienes de dominio público en principio no son objeto de matriculación en el Registro inmobiliario (art. 10 Ley 17801). "Dicha situación constituye el corolario de encontrarse los bienes afectados al régimen exorbitante de la dominicalidad exceptuados del recaudo de la registración, razón por la cual no se anotan en los registros respectivos" (Deferrari, 2025, p. 62).

La ausencia de registración de los cauces[15], y el carácter inalienable de los bienes públicos, lleva a que no apliquen a los mismos las previsiones del Decreto 1300/69 sobre la necesidad de concretar mensura antes del cambio de titularidad registral, no existiendo hasta el momento una regulación en el derecho administrativo mendocino que estipule la necesidad de mensurar los bienes de dominio público hidráulico u otros bienes del dominio público natural.

Por otra parte, y como se ha expresado *supra*, la determinación de la línea de ribera no constituye el dominio público, sino que es declarativa del mismo, a partir de la constatación de un hecho natural expresa los límites de un objeto natural existente que está afectado al dominio público, siendo también las propiedades ribereñas condicionadas en su extensión y límite por tal hecho hidrológico.

De este modo, y a pesar de que los cauces como polígonos territoriales no son objeto de

15 La consideración efectuada no omite lo dispuesto por la Dirección de Registros Públicos y Archivo Judicial de Mendoza en la Orden de Servicio, Calificación y Registración 4-24, donde se regula la actualización de la titularidad a nombre del Estado de bienes afectados al dominio público que contaban con una matrícula previa por haber sido inicialmente matriculados cuando eran predios privados. Pero en el caso del denominado "dominio público natural" -como los cauces y lechos- la afectación se produce desde un inicio por imperio legal (SCJM, 2024), y de allí tales elementos indefectiblemente son alcanzados por el régimen específico de derecho público sin que hayan sido afectados a partir de una matriculación previa como bienes de particulares.

mensura, su levantamiento topográfico y planimetría impactará sustancialmente en las actividades de mensura de los predios ribereños de dominio privado.

El procedimiento de levantamiento parcelario es regido por la Ley 26209, que estipula que las mensuras resultan actos para la determinación de los estados parcelarios de los predios, y deben ser ejecutadas y autorizadas por profesionales con incumbencia en la agrimensura (art. 6). La registración del acto de mensura en el organismo de aplicación -en Mendoza, la Dirección General de Catastro dependiente de la Administración Tributaria Mendoza- constituye y/o verifica la subsistencia del estado parcelario del inmueble, debiendo el plano de mensura contar con los elementos que permitan definir la parcela y su estado (art. 7, 8 y 9).

Reglamentariamente, el Decreto 1300/69 -modif. por Decretos 2278/69 y 1765/70-, establece que previo a la transmisión total o parcial de un inmueble deberá contarse con el plano de mensura actualizado de la propiedad, debiendo la autoridad de aplicación expedir el Certificado Catastral en el que se acredite la visación de dicho plano (arts. 3 y 6), certificado que -según el Decreto 507/63- constituye el "instrumento básico" del régimen catastral que debe identificar -entre otros aspectos- los linderos del inmueble (arts. 23 y 24).

Dentro de los elementos definidos como "esenciales" en la conformación de una parcela y la constitución de su estado parcelario destacan "los límites del inmueble, en relación a las causas jurídicas que les dan origen" (art. 5 numeral I.b e in fine, y 7 Ley 26209), estipulándose en la reglamentación que en las operaciones de campo y gabinete dirigidas a individualizar geométricamente la parcela catastral para su representación gráfica en los planos respectivos, su delimitación debe tener en cuenta los antecedentes documentales que hacen la mensura o título del predio (art. 5 y 8 Decreto 507/63).

Con ello, y siendo los límites de los inmuebles un elemento esencial de la conformación de una parcela y la constitución de su estado parcelario que debe ser constatado en las mensuras de los predios ribereños, resultará fundamental el deslinde administrativo del dominio público hidráulico que se realiza con la determinación de la línea de ribera.

Como regulaciones específicas al respecto, en las normas para la confección de planos de mensuras aprobadas por Resolución 49/25 DGC se estipula en relación al croquis de ubicación del predio que "para Mensuras de Propiedades Rurales: deberá indicarse la ubicación de la propiedad a hechos físicos tales como: calles con nombre, canales, ferrocarriles, ríos, etc."; lo que obviamente condiciona la labor de mensura en cuanto a la referencia de tales fenómenos hidrológicos.

A su vez, las "Instrucciones Generales para Agrimensores" aprobadas por el Decreto 1252/44- regulan en su art. 14 la técnica a emplear para relevar cuerpos hídricos en los actos de levantamiento parcelario. Al respecto se estipula que el relevamiento de las riberas se practicará por una línea poligonal y sobre esta línea se trazarán coordenadas, determinando puntos que no disten de más de 200 metros uno de otro en terreno, distancia que se reduce a 100 metros en terrenos de mayor valor, y más cerca cuando sea

indispensables para representar exactamente un límite o un detalle de relevamiento; sin perjuicio de que en virtud de dificultades del terreno pueda hacerse el relevamiento taquimétrico o por triangulación. Siendo que la superficie de los cursos de agua (arroyos, esteros o lagunas) que limiten o estén comprendidos en propiedad particular serán o no incluidas en el área que corresponde al título, según los antecedentes del mismo o los hechos que determinen la posesión (art. 15).

Más allá de estas instrucciones "generales", en el caso de los deslindes particulares de inmuebles que confinan con ríos, el Decreto 131/49 estipuló la necesidad que el deslinde y amojonamiento de los predios privados esté hecho en base a las márgenes que surgen de la línea de las crecientes ordinarias que resultan determinadas por las más altas aguas en su estado normal (art. 1.a), debiendo los Ingenieros y Agrimensores atender las instrucciones que brinde la actual Dirección General de Catastro (art. 2). Y dicha Dirección ha brindado una instrucción específica -Resolución 783/06 DPC- en la que estableció con alcance para todos los ríos provinciales (art. 3), que todo plano de mensura de inmuebles lindantes con ríos o arroyos de la Provincia debe ajustarse a la demarcación material de la línea de ribera realizada y aprobada por el Departamento General de Irrigación, de acuerdo con las instrucciones que el citado Organismo imparta (art. 1).

Es claro entonces, que la línea de ribera establecida en el procedimiento administrativo de deslinde del dominio público hidráulico condiciona el trabajo de levantamiento parcelario mediante mensura de los predios ribereños, debiendo solicitarse instrucciones al Departamento General de irrigación para la labor que lleva adelante el profesional responsable de tal mensura.

Pero, ¿qué ocurre cuando el deslinde del cauce aún no ha sido realizado por la autoridad del agua? No debe caerse en el equívoco de entender que no existe el límite como elemento esencial de la parcela y su estado; el mismo existe y es definible, aunque aún esté indefinido; ya que el límite que separa el cauce de la parcela ribereña se conCuadro *ministerio legis*, por efecto de los arts. 235 y 1960 CCyC en concordancia con los arts. 40, 42 y 43 LA, y consiguientemente es ineludible el requisito de requerir instrucciones a la autoridad del agua competente en el deslinde administrativo del cauce.

Dentro de la técnica catastral es usual que el profesional actuante exprese en el apartado correspondiente a "certificaciones, observaciones y notas" del plano que la línea de ribera aún no se encuentra determinada mediante el deslinde administrativo, y que por tanto la graficación de tal límite reviste un carácter provisorio hasta tanto se concrete la referida determinación.

Dicha técnica catastral no es extraña ni en la ciencia cartográfica, ni en la técnica legal comparada. Fue recomendada por unanimidad en el VIII Congreso Nacional de Cartografía de 1991 para su implementación por las autoridades de las provincias argentinas (Belaga y Vicioso, 1991); y, según explica Espínola (2010, p. 14), responde a que -salvo excepciones- en Argentina es normal que no se haya concretado la determinación de la línea de ribera, y por ello dicha técnica ha sido efectivamente adoptada como solución

en diversas provincias; pudiendo también identificarse está técnica catastral en los reglamentos estipulados en las Resoluciones 11821/85 y 2147/88 DH de Córdoba; en el art. 31 del Decreto 1309/17 de Santa Fe; en el art. 63 del Decreto 220/02 de Río Negro; en el Acta del Consejo de Hidráulica n° 2458/05 de San Juan; y en la Resolución 421/21 del ICAA de Corrientes; entre otros.

Debe observarse, finalmente, que ese carácter de provisoriedad de la graficación de la mensura del predio ribereño intertanto no se concrete el deslinde del dominio público hidráulico es compatible con la naturaleza misma de la línea de ribera, la que como se ha expresado *supra* al referir la nota al art. 2572 CC, es dinámica y evoluciona en el tiempo como consecuencia de la movilidad natural que los cauces presentan como hecho natural, lo que lleva a que incluso cuando el deslinde administrativo se ha realizado, el estado parcelario verificado presenta la variabilidad propia de su acrecentamiento por causa de aluvión, avulsión, retiro natural de las aguas o cauce abandonado según contemplan expresamente los arts. 1959 y 1961 CCyC; y sus contrapartidas en la pérdida por avulsión (art. 1961 CCyC), así como la erosión ribereña o el aumento natural de las aguas que extienden el cauce (art. 235 CCyC) o cuando las aguas abandonan el cauce de una orilla para retirarse inundando la otra (art. 1959 CCyC).

8.4 CRECIENTE DE DISEÑO: CONCEPTOS HIDROLÓGICOS

8.4.1 Criterios metodológicos para el cálculo

Los estudios de la delimitación de líneas de ribera han requerido históricamente de la definición de la "creciente de diseño", es decir la determinación del caudal con que se deben realizar las modelaciones hidráulicas, o hidrológicas, de tirantes de agua y la respectiva cota de estas líneas.

A partir del nuevo Código Civil y Comercial el criterio de determinación que establece la norma es "el promedio de las máximas crecidas ordinarias", explicitándose el requerimiento metodológico para su determinación. Sin embargo, bajo el régimen anterior a 2015, el concepto de "más altas aguas en su estado normal" permitía soluciones desde la hidrología empírica y la constatación de evidencias geomorfológicas y materiales; pero también desde un abordaje estadístico que expusiera el caudal normal en base a periodos de retorno.

Esta última fue la metodología empleada en el estudio de caso que se expone *infra* para la determinación de la línea de ribera del río Mendoza, apoyada además en verificaciones empíricas.

Por lo tanto, es oportuno desde la Hidrología analizar ambos conceptos y sus particularidades. Cada uno se fundamenta en técnicas de análisis de frecuencia estadística y tiene implicaciones distintas para la gestión del dominio público hidráulico y para el diseño de

obras.

8.4.1.1 Crecidas ordinarias

La legislación argentina escoge el criterio de establecer que la línea de ribera delimita el dominio público a partir del promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO). Esta denominación enfatiza la operación estadística: se promedian los valores extremos ordinarios (máximos) y se obtiene un caudal medio que brinda una única magnitud referencial de la máxima crecida ordinaria para toda la serie analizada.

La utilización de la media tiene una motivación práctica: en muchas series de crecidas la diferencia entre la "media" y la "mediana" de las máximas anuales no es significativa, de modo que el promedio resulta un parámetro estable y sencillo de calcular con datos observados.

No obstante, el promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO) no debe confundirse con la medición puntual de una crecida. El concepto de máxima crecida ordinaria se refiere a las inundaciones que, aun siendo las mayores del año, se producen bajo el régimen normal del río; excluyen eventos extraordinarios causados por fenómenos excepcionales.

La línea de ribera resulta así una línea fijada por la cota asociada legalmente a ese promedio de las "máximas crecidas ordinarias". Es decir, la ley asocia un hecho natural (máximas crecidas ordinarias) y una metodología (promedio) para establecer una línea determinante del dominio público hidráulico, regulando el alcance y límite jurídico del cauce.

Esto no quiere decir que no existan situaciones hidrológicas con caudales por encima de esa cota, es decir, que desborden el cauce. Las mismas pueden ser crecidas extraordinarias, o incluso ordinarias que resulten de caudal superior al promedio; pero por mandato legal ese promedio es lo que define el límite, tanto del cauce y las playas que pertenecen al dominio público como de los terrenos ribereños; hidrológicamente, estos últimos están sujeto a riesgos de inundación por caudales superiores al fijado en la norma como límite del cauce, lo que -como se analiza *supra*- conlleva la posibilidad de obras de defensa particulares y/o públicas.

El cálculo de la línea de ribera implica un análisis estadístico de los máximos anuales en un periodo representativo, es decir, el análisis de una serie de "valores extremos". Se define como una serie de "valores extremos", a la serie que se constituye con los valores máximos, o mínimos, producidos en cada uno de los intervalos de tiempo de igual longitud en que se haya dividido el registro. Y para el caso de las máximas crecidas ordinarias la serie de valores extremos se constituirá en base a los máximos, de modo que se puede definir:

√ valores extremos crecidas máximas

√ intervalo de tiempo de igual longitud año hidrológico

Los requisitos que debe cumplir la información hidrológica (eventos extremos) es que debe ser independiente; estar idénticamente distribuida (por ejemplo, precipitación diaria máxima anual); y el sistema hidrológico que la produce (por ejemplo, un sistema de tormenta) sea aleatorio, independiente del espacio y del tiempo.

8.4.1.1.1 Año calendario o año hidrológico

La información hidrológica empleada debe ser seleccionada cuidadosamente, de manera tal que se satisfagan las suposiciones de independencia y de distribución idéntica.

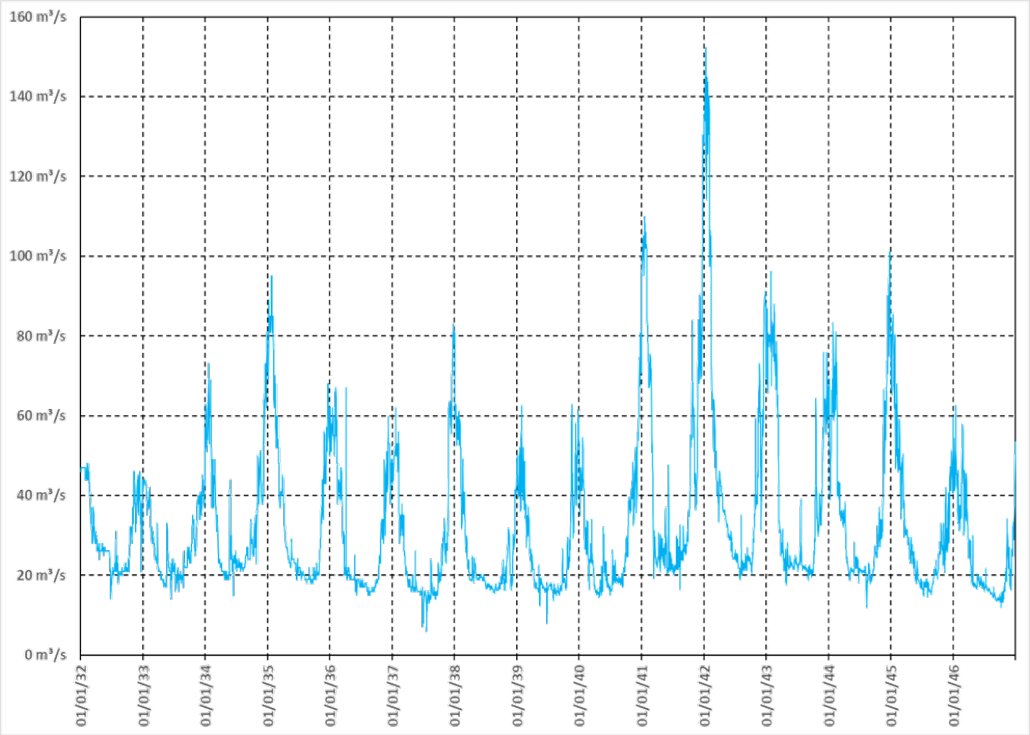
En la práctica, esto se lleva a cabo usualmente seleccionando el máximo anual de la variable bajo análisis (por ejemplo, el caudal máximo anual, que puede corresponder a una serie de caudales instantáneos o a una serie de caudales medios diarios (QMD), con la expectativa de que observaciones sucesivas de esta variable de un año a otro sean independientes. Generalmente, y debido a la información que se dispone públicamente, se utiliza este último registro de caudales medios diarios (QMD) para seleccionar los valores máximos de cada año hidrológico.

Respecto de la independencia y representatividad de los datos de crecidas, la hidrología de eventos extremos utiliza como período de análisis el "año hidrológico", que para ríos de régimen termonival del hemisferio sur, no coincide con el año calendario.

Si se analiza la serie de caudales medios diarios (QMD) histórica de un río con estas características, se obtiene un gráfico como el del Cuadro 8.1

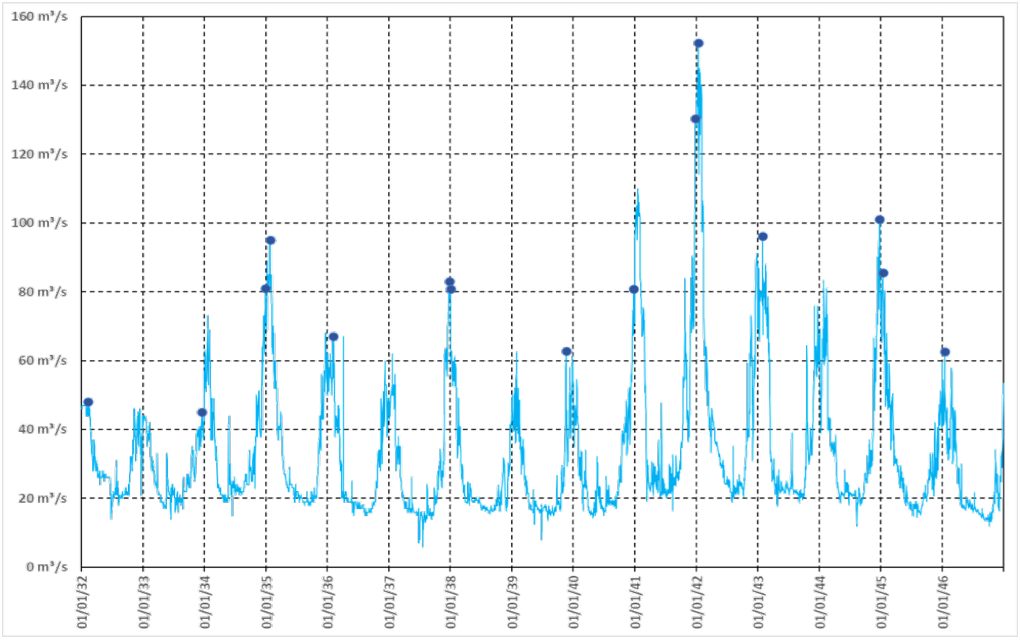
En el primer análisis que se puede hacer para obtener los valores extremos, si se utiliza el "año calendario" como intervalo de tiempo de igual longitud, o sea, del 1 de enero al 31 de diciembre de cada año, se obtienen lo representado en el Cuadro 8.2

Cuadro 8.1 Serie histórica de caudales medios diarios (QMD)



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.2 Máximos caudales medios diarios (MQMD) Año Calendario

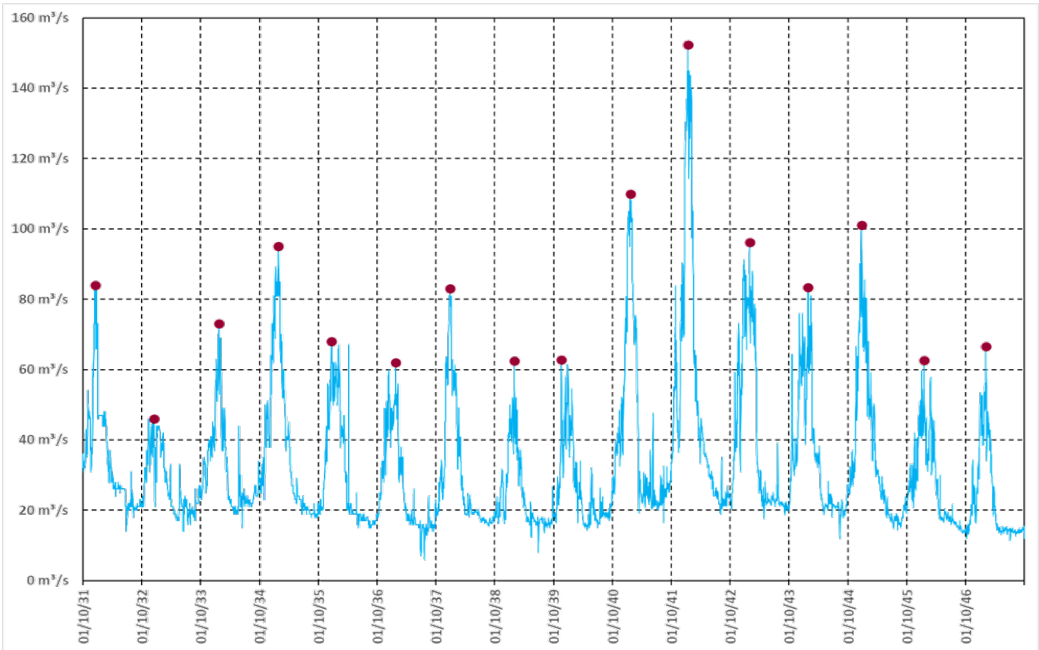


Fuente: Elaboración propia

Del análisis de estos caudales se observan varias situaciones que atentan contra la independencia, por un lado, y contra la distribución idéntica, por otro, como son:

- √ Hay crecientes (veranos de los años 1932/33, 1936/37, 1938/39 o 1943/44) en las que no se ha tomado ningún valor, o sea, los datos no están representando correctamente las variaciones naturales del río.
- √ Hay datos que no son los mayores de la creciente anual (veranos de los años 1933/1934 y 1940/41), por lo que no se logra la serie de valores extremos anuales.
- √ Se han tomado dos datos para la misma creciente del río (veranos de 1934/35, 1937/38, 1941/42 y 1944/45), por lo que no se logra la necesaria independencia de datos.
- √ Por el contrario, si se adopta el intervalo de tiempo de igual longitud al "año hidrológico", que es el que hay entre las épocas en que se producen los caudales medios diarios mínimos (junio o julio para las cuencas del hemisferio sur), todos los inconvenientes antes enumerados, al adoptar los valores extremos, desaparecen (Ver Cuadro 8.3).
- √ En este gráfico se ha marcado el año hidrológico entre el 01 de octubre de un año hasta el 30 de setiembre del siguiente, debido a conveniencias en la gestión y pronóstico de los ríos, dado que las nevadas importantes se producen hasta mediados del mes de setiembre. Esta adopción no cambia las características de independencia e igual distribución de la serie de valores extremos.

Cuadro 8.3 **Máximos caudales medios diarios (MQMD) Año Hidrológico**



Fuente: Elaboración propia

8.4.1.2 Crecidas normales

La conceptualización de aguas en su estado normal exige un análisis hidrológico de la habitualidad, es decir la recurrencia o retorno de un fenómeno de crecida. Recordemos que la definición de tiempo de recurrencia: es el promedio en años, en los que un valor dado (caudal para nuestro estudio), es igualado o superado, dentro de la serie histórica.

La hidrología fluvial y la geomorfología asignan un rol particular a la crecida con recurrencia de 2 años (TR2). Investigaciones geomorfológicas indican que el "caudal formador" de cauce (bankfull discharge) suele tener un intervalo de recurrencia de 1,50 a 2,33 años y constituye el flujo dominante que da forma al canal, ya que es el que realiza más trabajo geomórfico, es decir, el que moviliza la mayor cantidad de sedimento, y se sitúa en torno al evento de recurrencia de 2 años (TR2).

Estas observaciones respaldan la elección de la crecida de 2 años como referencia para el dimensionamiento de cauces y para la delimitación de líneas de ribera: representa una crecida frecuente, "normal" y geomórficamente eficaz.

Este criterio se usa técnicamente para establecer qué nivel alto es normal para el cauce, porque ese caudal/nivel representa la condición más frecuente en que el canal está lleno sin inundar.

Desde el punto de vista estadístico, la serie de caudales máximos anuales suele presentar una distribución asimétrica con cola hacia valores elevados. Al analizar esa serie, los hidrólogos emplean funciones de distribución (Gumbel, log–normal, log-Pearson III, etc.) para estimar probabilidades de excedencia y períodos de retorno.

El tiempo de recurrencia (TR) o período de retorno de un evento de caudal "q", se define como el inverso de la probabilidad anual de que el caudal sea igualado o superado, "P". Es el tiempo promedio, en que "q" puede ser igualado o superado. . Por lo tanto, el caudal con un tiempo de recurrencia de 2 años (TR2) es el caudal que es igualado o superado, en promedio, cada 2 años.

Si "F" es la probabilidad acumulada de no excedencia, o sea, la probabilidad acumulada de que sea menor a un valor, el período de retorno para la superación es:

$$TR = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - F}$$

La "mediana" estadística de una serie, es el evento con un 50 % de probabilidad de ser alcanzado o superado cada año, tiene por definición, un tiempo de recurrencia de 2 años (TR2):

$$TR_{2\ años} = \frac{1}{0.50} = \frac{1}{1 - 0.50}$$

Comparando el promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO) con el caudal de recurrencia 2 años (TR2) se observa que los dos conceptos se basan en la serie de máximos anuales, pero difieren en su interpretación estadística. El PMCO es una medida de tendencia central que resulta del "promedio o media" de los máximos anuales representativos, mientras que el caudal de TR2 corresponde a la "mediana" de esa serie.

Cabe recordar que en distribuciones simétricas (Normal) los valores de "media" (promedio) y "mediana" (probabilidad del 50%) coinciden, no así en las distribuciones asimétricas (Gumbel, log-normal, log-Pearson III).

Aunque, en el caso de que la distribución de crecidas es moderadamente asimétrica, la diferencia entre la media y la mediana puede ser pequeña y, por tanto, el promedio de las máximas crecidas ordinarias se aproxima a la crecida de 2 años. Sin embargo, en ríos con crecidas altamente variables o con series cortas, la media puede verse influida por valores extremos, desplazando el PMCO por encima de la mediana; en tales casos, utilizar el PMCO puede sobrestimar la cota natural del río y ampliar en exceso la zona de dominio público, por lo que resulta conveniente verificar los resultados contrastándolos con la realidad que surge de evidencias hidrológicas y materiales.

Desde la perspectiva normativa, actualmente la legislación argentina, y la española, opta por el promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO) como criterio para demarcar el dominio público hidráulico porque brinda un límite jurídico claro y basado en datos observados.

En síntesis, el promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO) es un promedio de los máximos anuales. El tiempo de recurrencia de 2 años (TR2) es una medida estadística (mediana) que identifica el caudal con 50 % de probabilidad anual de ser superado y coincide con el "caudal formador" de cauce o caudal normal.

Para la determinación del caudal con un tiempo de recurrencia de 2 años, se realizan cuatro tareas:

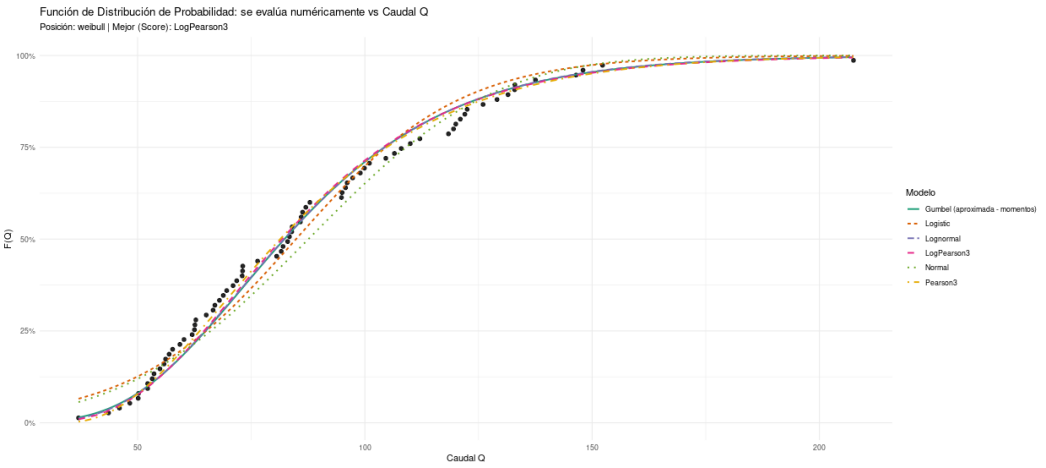
1° se calcula la función de distribución acumulada empírica de la serie de valores estudiados (muestra estadística de la población infinita de caudales). Pueden utilizarse varias metodologías, como la de Weibull, que utiliza la fórmula $F_{(x)} = \frac{n}{N+1}$, siendo "n" el orden del dato, ordenados en forma ascendente y "N" el número total de datos. Ver serie de puntos en el Cuadro 8,4;

2° se ajustan diversas funciones de probabilidad teóricas "$F_{0(x)}$" (Cuadro 8.4), entre las que se encuentran: Normal "$F_{N(x)}$", Log-Normal "$F_{LN(x)}$", Pearson III "$F_{P(x)}$", Log-Pearson III "$F_{LP(x)}$", Logística "$F_{L(x)}$" y Gumbel "$F_{G(x)}$";

3° se aplican métodos de bondad de ajuste, para identificar qué función de probabilidad teórica representa mejor a la variable estudiada;

4° se determina la creciente normal, igual al caudal con un tiempo de recurrencia de 2 años (TR2).

Cuadro 8.4 **Función acumulada empírica y funciones teóricas de distribución**



Fuente: Elaboración propia

A continuación, y considerando que la variable en estudio es "caudal" $(x = q)$ se presentan las ecuaciones de "$f_{0(q))}$" (Función de Densidad de Probabilidad - PDF) y "$F_{0(q))}$" (Función de Distribución de Probabilidad - CDF) para algunas funciones de probabilidad comúnmente utilizadas, así como los parámetros que intervienen y las funciones de Excel disponibles para evaluarlas.

8.4.1.2.1 Distribución Normal

La distribución normal N(μ,σ²) utiliza la función de densidad de probabilidad (PDF):

$$f_{N(q)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma} * e^{\left(-\frac{(q-\mu)^2}{2*\sigma^2}\right)}$$

Siendo:

μ la media de la serie de datos o

σ su desviación estándar

Su función de distribución de probabilidad acumulada (CDF) es la integral de esta densidad. En la práctica no se realiza la integración manual ya que Excel se utilizan las siguientes funciones:

=NORM.DIST (q,μ,σ,lógico) para obtener la CDF o PDF (argumento "lógico" VERDADERO o FALSO, respectivamente);
=INV.NORM (p,μ,σ) para obtener la CDF inversa

8.4.1.2.2 Distribución Log-normal

Si se utiliza la serie de valores de logaritmos naturales de los caudales "q", y se le aplica una distribución Normal con media μy y desviación estándar σy, entonces "q" tiene una distribución log–Normal. Su función de densidad es:

$$y = ln(q)$$

$$f_{LN(q)} = f_{N(y)} = f_{N(ln\,(q))} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma y * q} * e^{\left(-\frac{(ln\,(q)-\mu y)^2}{2*\sigma y^2}\right)}$$

Siendo:

μy la media de la serie de datos "y",

σy su desviación estándar.

En Excel son:

=LOGNORM.DIST(y,μy,σy,lógico) devuelve la PDF o la CDF, con igual argumento lógico que en la función anterior;
=INV.LOGNORM(p, μy,σy) para obtener la CDF inversa.

8.4.1.2.3 Distribución Pearson III

La familia de distribuciones Pearson, responde a una distribución Gamma de tres parámetros (α, β, X0) y se define:

$$t = q - X0$$

$$f_{P(t)} = f_{P(q-X0)} = \frac{\left(\frac{1}{\beta}\right)^{\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{\beta}}}{\Gamma_{(\alpha)}}$$

$$\alpha = \left(\frac{2}{CA}\right)^2$$

$$\beta = \frac{\sigma}{\sqrt{\alpha}}$$

$$X0 = \overline{q} - \alpha * \beta$$

Siendo:

CA el coeficiente de asimetría de la serie de datos de "q";

La función de distribución acumulada se evalúa mediante la función gamma incompleta, con las siguientes funciones de Excel:

=GAMMA.DIST(t,α,β,lógico) devuelve la CDF para el argumento lógico = VERDADERO y PDF para FALSO.
=INV.GAMMA(p,α,β) para obtener la CDF inversa.

8.4.1.2.4 Distribución log-Pearson III

Se obtiene aplicando la distribución Gamma a los logaritmos naturales de los datos "q":

$$y = ln\,(q)$$

$$t1 = y - X1 = ln\,ln\,(q) - X1$$

$$f_{P(t1)} = f_{P(ln\,(q)-X1)} = \frac{\left(\frac{1}{\beta 1}\right)^{\alpha 1}\; t^{\alpha 1-1}\; e^{-\frac{t1}{\beta 1}}}{\Gamma_{(\alpha 1)}}$$

$$\Gamma_{(\alpha 1)} = \int_0^{\infty} t1^{\alpha 1-1}\, e^{-t1}\, dx$$

$$\alpha 1 = \left(\frac{2}{CA1}\right)^2$$

$$\beta 1 = \frac{\sigma 1}{\sqrt{\alpha}}$$

$$X1 = \overline{y} - \alpha 1 * \beta 1$$

Los parámetros $\alpha 1$, $\beta 1$ y X1 se obtienen del método de momentos aplicado a los logaritmos de los datos "q".

La CDF se calcula evaluando la función Gamma acumulada. En Excel, para la muestra transformada, se evalúa como:

`=GAMMA.DIST(t1,α1,β1,lógico)` devuelve la CDF para el argumento lógico = VERDADERO y PDF para FALSO;
`=EXP((INV.GAMMA(p, α1,β1))+X1)` para obtener la CDF inversa.

8.4.1.2.5 Distribución Logística

La distribución Logística tiene sus funciones de densidad y acumulada son:

$$f_{L(q)} = \frac{e^{-\frac{(q-\mu)}{s}}}{s * \left(1 + e^{-\frac{(q-\mu)}{s}}\right)^2}$$

$$F_{L(q)} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{(q-\mu)}{s}}}$$

$$s = \frac{\sigma * \sqrt{3}}{\pi}$$

No existe una función predefinida para la distribución Logística en Excel y se implementa con fórmulas genéricas:

`=EXP(-(q-μ)/s)/(s(1+EXP(-(q-μ)/s))^2)` para la PDF

`=1/(1+EXP(-(x-μ)/s))` para la CDF

`=μ+s*LN(p/(1-p))` para la CDF inversa

8.4.1.2.6 Distribución de Gumbel

La distribución de Gumbel es una función Tipo I de valores extremos, y para máximos es un caso particular de la familia GEV, o distribución Generalizada de Valores Extremos (es una familia de distribuciones continuas que se utiliza para modelar el comportamiento de los máximos, o mínimos, de una serie.

Gumbel utiliza parámetros de ubicación μ y escala $\beta>0$ (corresponde a la GEV con parámetro de forma $\xi=0$), sus funciones son:

$$f_{G(q)} = \alpha * e^{-\alpha*(q-u)-e^{-\alpha*(q-u)}}$$

$$F_{G(q)} = e^{-e^{-\alpha*(q-u)}}$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{\sigma_{y1}}$$

$$u = \mu - \frac{\mu_{y1}}{\alpha} = \mu - \frac{y1}{\alpha}$$

$$y1 = -ln\left\{ln\left(\frac{1+N}{n}\right)\right\}$$

En forma aproximada se puede adoptar:

$$\alpha = \frac{\pi}{\sigma * \sqrt{6}}$$

$$\mu_{y1} = 0.577216$$

$$\sigma_{y1} = 1.2825$$

$$u = \mu - \sigma * \frac{\mu_{y1}}{\sigma_{y1}}$$

Excel estándar no incluye función Gumbel. Se puede usar el complemento Real Statistics con las funciones GUMBEL_DIST y GUMBEL_INV.

Las fórmulas utilizadas en general son:

`=α*EXP(-α*(x-μ)-EXP(-α*(x-μ)))` para la PDF

`=EXP(-EXP(-α*(x-μ)))` para la CDF

`=μ-LN(-LN(p))/α` para la CDF inversa

8.4.1.2.7 Prueba bondad de ajuste

La bondad de ajuste es una herramienta que permite evaluar qué tan bien un conjunto de datos observados se ajusta a la forma esperada según un modelo probabilístico, o sea, las pruebas de bondad de ajuste surgen cuando, a partir de una muestra de datos, se desea verificar si:

- √ los datos se comportan como una distribución teórica específica, o sea, que tan similares son $F_{(q)} \approx F_{0(q)}$;
- √ si se han aplicado varias distribuciones teóricas, cuál de ellas representa mejor a los datos estudiados.

Las pruebas más comúnmente utilizadas son Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling o la chi-cuadrado.

Estas pruebas se enmarcan en la Metodología de Hipótesis Estadísticas, y como su nombre lo indica, se formulan como:

- √ hipótesis nula (H0) que los datos son representados por una distribución dada, o sea, $F_{(q)} \cong F_{0(q)}$;
- √ hipótesis alternativa (H1) que los datos no siguen ese modelo ($F_{(q)} \neq F_{0(q)}$).

Para contrastarlas se calcula un estadístico que resume las discrepancias entre las distribuciones teórica y la estimada; según la prueba.

El valor del estadístico se compara con un valor crítico determinado por el nivel de significancia "α" elegido, que es la probabilidad de cometer el error de rechazar H0, cuando en realidad es correcta o no existe evidencia suficiente para descartarla;

Si el estadístico es mayor que valor crítico, se concluye que la diferencia entre los datos y el modelo es demasiada y se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H1).

Para distribuciones continuas, la prueba de Kolmogorov–Smirnov el estadístico "$D_0 max$" es la máxima diferencia absoluta entre la función de distribución acumulada empírica de la muestra "$D_{(qi)}$" y la función de distribución teórica "$D_{0(qi)}$".

Este estadístico se compara con valor crítico "D_α", determinado por el nivel de significancia "α" elegido.

Esta prueba de Kolmogorov–Smirnov es atractiva porque su valor crítico "D_α" no depende de la distribución teórica probada, aunque sólo es válida cuando la distribución está completamente especificada y tiende a ser más sensible en valores intermedios de la serie que en las colas.

El cálculo se realiza con las siguientes variables:

$$D_{0_n} = D_{(q_n)} - D_{0(q_n)}$$

$$1 < n \leq N$$

$$D_0 max = maximo\left|D_{0_n}\right|$$

$$D_\alpha = C_\alpha / k_n$$

$$C_\alpha \begin{cases} \alpha = 10\% \rightarrow C_\alpha = 1.224 \\ \alpha = 5\% \rightarrow C_\alpha = 1.358 \\ \alpha = 1\% \rightarrow C_\alpha = 1.628 \end{cases}$$

$$k_n = 0.12 + \sqrt{n} + \frac{0.11}{\sqrt{n}}$$

$$si \begin{cases} D_0 max \leq D_\alpha \rightarrow \ se\ acepta\ H0 \\ D_0 max > D_\alpha \rightarrow se\ rechaza\ H0 \end{cases}$$

La función de distribución que mejor se ajusta a la serie de datos que se está estudiando es la que tiene el menor valor del estadístico, o sea, el menor .

Finalmente, se calcula el caudal para un tiempo de recurrencia de 2 años utilizando la función inversa de la que mejor ajusta a la serie de datos, con los parámetros calculados previamente:

$$q_{TR2} = \frac{1}{1 - invF_{0(50\%)}}$$

La función inversa de la función de distribución (percent point function) que mejor ajusta, permite estimar caudales para cualquier tiempo de recurrencia.

8.4.2 Ríos regulados

Un escenario de particular interés es el de los ríos regulados por presas o embalses. Aunque la intervención humana altere el hidrograma, el curso sigue siendo legalmente un cauce natural, manteniendo su lecho físico, meandros y terrazas, por lo que la línea de ribera continúa siendo el límite del dominio público.

Sin embargo, los caudales ordinarios ya no dependen solo de la variable climática, sino también de la operativa que viene definida por el régimen fijado para la operación del embalse. En estos casos, la máxima crecida ordinaria se vincula al caudal máximo del régimen normal de explotación, excluyendo erogaciones de emergencia o alivio por vertedero. O sea, exige una transición conceptual desde el análisis meteorológico hacia la gestión operativa de sistemas hidráulicos.

Desde una perspectiva técnica y metodológica, el factor primordial para definir la mayor crecida ordinaria en estos escenarios es el caudal máximo del régimen normal de

explotación de acuerdo a las normas de manejo del embalse. Este parámetro corresponde a las erogaciones que la presa realiza de forma recurrente y planificada para satisfacer las demandas de uso del recurso, tales como el riego, el abastecimiento poblacional o la generación hidroeléctrica, excluyendo maniobras excepcionales, fallas o descargas de alivio por vertedero.

Para realizar este cálculo, se debe usar la hidrología efectiva actual en lugar de intentar reconstruir series naturalizadas. Esto implica que se debe trabajar con los registros de caudales efectivamente erogados y niveles observados desde la puesta en servicio de la obra, construyendo series de máximos que reflejen la respuesta del sistema bajo regulación.

Un indicador operativo de gran precisión para establecer la frontera de la "ordinariedad" es el umbral de emergencia: si las normas de manejo estipulan que a partir de cierto caudal se deben activar sistemas de aviso, planes de emergencia o protocolos de prevención por efectos perjudiciales a la población, ese valor se convierte técnicamente en el límite superior de lo ordinario, ya que superado el mismo el embalse funciona en un régimen excepcional de emergencia. Cualquier erogación que supere dicho umbral, debe ser excluida del cálculo de la línea de ribera por representar una situación de excepcionalidad operativa.

Esta definición de normalidad debe ser siempre contrastada con una verificación geomorfológica en el terreno. La presencia de la obra o dique, puede generar efectos a largo plazo, como el estrechamiento del canal activo o el avance de la vegetación sobre las márgenes debido al nuevo régimen de erogación. La lectura de campo permite asegurar que el nivel ordinario calculado operativamente sea coherente con las evidencias físicas y huellas persistentes que las sueltas de agua periódicas dejan en el cauce, garantizando que el cálculo matemático se ajuste efectivamente a la realidad funcional del río bajo control de la ingeniería.

8.4.3 Cauces sin registros hidrométricos

Cuando no existen series hidrométricas de caudales, por ejemplo, caudales medios diarios (QMD), la "crecida de diseño" puede establecerse mediante algún método de transformación lluvia/escorrentía, con una cadena de modelación que comienza en la tormenta de proyecto (frecuencia, duración y distribución temporal/espacial de la precipitación) y termina en un hidrograma de caudales en la sección de interés.

En ese marco, es habitual asumir que una lluvia con una determinada probabilidad anual de excedencia o tiempo de recurrencia, genera una crecida con la misma recurrencia.

Esta es la hipótesis de trabajo que subyace al método de lluvia/escorrentía, aunque no es una identidad física y debe verificarse con análisis de sensibilidad, sobre todo en cuencas con alta no linealidad hidrológica.

El primer requisito técnico es definir de manera consistente la tormenta de proyecto, porque en un modelo lluvia/escorrentía, el "caudal de diseño" no depende solo del total precipitado, sino de cómo ese total se distribuye en el tiempo y sobre el área de la cuenca.

La duración de la tormenta es fundamentalmente definida por el tipo de precipitación, que se puede producir en la cuenca que aporta al cauce, y que genera mayores crecientes asociadas. También debe ser compatible con la respuesta hidrológica del sistema (tiempo de concentración, almacenamiento y propagación).

Si la cuenca no es pequeña, no alcanza con una lluvia concentrada, como las producidas por tormentas convectivas. Debe considerarse un procedimiento equivalente para transformar una precipitación puntual de frecuencia dada en una precipitación media areal efectiva, porque la hipótesis de uniformidad espacial suele fallar en tormentas intensas.

Posteriormente, la modelación hidrológica propiamente dicha requiere representar, con un nivel de detalle apropiado al objetivo, los principales eslabones del proceso precipitación/escorrentía: pérdidas (intercepción, infiltración y almacenamiento inicial), transformación de lluvia efectiva en escorrentía directa, aporte de base (si corresponde al evento) y propagación por cauces y controles.

Una referencia clásica de requisitos mínimos para cualquier modelación lluvia/escorrentía orientada a crecidas de diseño indica que los modelos deben organizar los componentes de cálculo de volumen de escorrentía, modelos de escorrentía directa, modelos de flujo base y modelos de tránsito en cauces, con alternativas que van desde formulaciones sintéticas/conceptuales hasta opciones más distribuidas.

En un nivel básico (apto para cuencas pequeñas con información limitada), la calidad del resultado depende críticamente de una caracterización hidrológica consistente de la cuenca. Esto implica delimitar subcuencas relativamente homogéneas, asignar parámetros de pérdidas a partir de suelos y coberturas, y estimar tiempos característicos (tiempo de concentración, retardos) ligados a longitudes hidráulicas, pendientes, rugosidad y presencia de impermeabilización.

En una metodología ampliamente usada, como el método Curve Number (CN) o Número de Curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EEUU, ahora conocido como Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), los parámetros se vinculan explícitamente a grupos hidrológicos de suelo y tipos/condiciones de cobertura.

Un escalón de complejidad siguiente consiste en adoptar una estructura que permita separar explícitamente los mecanismos relevantes para eventos extremos: por ejemplo, pérdidas con dependencia de humedad antecedente, transformación con hidrogramas unitarios paramétricos (SCS, Snyder, Clark) o con ondas cinemáticas, y propagación en cauce con esquemas tipo Muskingum/Muskingum-Cunge o almacenamiento, según corresponda.

La ventaja de esta estructura es que permite consultar al modelo qué está controlando el pico: si es la infiltración inicial, la capacidad de almacenamiento superficial,

la concentración temporal de la lluvia (bloques intensos), o la atenuación y traslación en el cauce. Toda esta trazabilidad es especialmente importante cuando se intenta asociar "normalidad" a tiempos de recurrencia de 2 años: en una cuenca con fuerte control por humedad antecedente, una tormenta con 2 años de recurrencia puede producir una crecida con una frecuencia distinta si el estado inicial del suelo no es representativo del "estado normal".

En síntesis, para transformar tormentas de proyecto (precipitación) en crecientes de diseño (caudales) en cauces sin registros, la modelación debe estar construida sobre: una definición hidrológicamente consistente de la tormenta (frecuencia, duración, distribución temporal y ajuste areal), una caracterización físicamente defendible de pérdidas y tiempos de respuesta, un esquema de transformación y propagación adecuado a la escala, y un tratamiento explícito de incertidumbre mediante escenarios y sensibilidad. Bajo esos requisitos, asociar "normalidad" a tiempo de recurrencia de 2 años puede hacerse operativo usando tormentas con esta recurrencia como insumo, pero el resultado debe presentarse como "crecida de diseño condicionada al modelo y a los estados iniciales adoptados", no como una equivalencia automática entre frecuencias.

8.5 LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

La precisión requerida para la delimitación de la línea de ribera ha impulsado una transición desde los antiguos métodos de hidrografía empírica hacia un sistema de alta precisión que garantiza la seguridad jurídica de los predios.

El levantamiento topográfico es el conjunto de operaciones técnicas destinadas a representar gráficamente la configuración de un terreno, siendo un requisito indispensable no solo para definir el dominio público bajo administración estatal; sino también para las operaciones de mensuras, que es la operación técnica-legal mediante la cual se determina el estado parcelario de un inmueble, incluyendo sus límites.

Actualmente, la ingeniería en agrimensura emplea herramientas de medición remota y posicionamiento satelital que permiten alcanzar una exactitud centimétrica en la representación geográfica del territorio.

Dentro de las tecnologías de teledetección y captura de datos aéreos, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), conocidos comúnmente como "drones", se han convertido en una herramienta fundamental para obtener productos fotogramétricos y ortofotos de gran detalle.

Estos dispositivos facilitan la delimitación incluso en tramos fluviales que carecen de estaciones hidrométricas, permitiendo abarcar mayores extensiones de terreno con una resolución espacial muy elevada. Asimismo, el uso de imágenes satelitales de alta resolución resulta esencial para estudiar la evolución histórica y geomorfológica del cauce, ayudando a identificar la extensión real de anegamientos ocurridos en el pasado.

En lo que respecta al posicionamiento y relevamiento directo en el terreno, la tecnología GPS RTK (Real Time Kinematic) es la solución estándar para obtener coordenadas de alta precisión en tiempo real para los puntos de ribera. Para relevamientos de secciones transversales complejas, se utilizan equipos de GPS de doble frecuencia que pueden operar en modo stop-and-go, permitiendo una captura de datos ágil y precisa para alimentar los modelos hidráulicos.

Para asegurar la eficacia técnica, estos relevamientos deben estar vinculados a redes geodésicas oficiales. La red geodésica oficial y el modelo de geoide en Argentina hoy se basan en el Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR07 (para coordenadas horizontales) y el modelo de geoide GEOIDE-Ar16 (para la relación entre el elipsoide y el geoide, transformando alturas elipsoidales a ortométricas), ambos gestionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). POSGAR07 es compatible con el sistema regional SIRGAS, y GEOIDE-Ar16 permite usar el Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (SRVN16).

A pesar del avance satelital, las estaciones totales y los niveles electrónicos siguen siendo instrumentos críticos para complementar el relevamiento en áreas donde la cobertura de la señal GPS es deficiente, como zonas con densa vegetación o cañones profundos. Estas herramientas permiten capturar con extrema fidelidad hechos físicos, edificaciones y marcas de erosión que sirven como indicadores geomorfológicos del cauce.

Toda la información recolectada se integra posteriormente en Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten procesar y superponer capas de topografía, imágenes y modelos hidráulicos para generar la delimitación cartográfica final.

8.6 DETERMINACIONES HIDRÁULICAS

Para deslindar y demarcar la línea de ribera es necesario determinar la crecida de diseño dada a partir del promedio de la máxima elevación alcanzada por el agua. Las crecidas de diseño se obtienen mediante estudios hidrológicos y se transforman en cotas de tirante a lo largo del cauce mediante modelación hidráulica.

Este proceso simula el comportamiento del río, representando su geometría, la pendiente del fondo y la rugosidad, y resolviendo las ecuaciones de conservación de la masa y del momento (Saint–Venant). El resultado son perfiles de superficie libre y velocidades que permiten identificar los distintos lugares de un cauce.

La elección del tipo de modelo (unidimensional, bidimensional o tridimensional, en régimen permanente o transitorio) depende de la naturaleza del problema, de las características del sistema, del nivel de detalle requerido y de la disponibilidad de datos. En la gran mayoría de los casos, en la determinación de la línea de ribera son suficientemente buenos los modelos unidimensionales (1D) en régimen permanente.

Un modelo 1D considera el flujo promedio en secciones transversales del cauce. Para construirlo se necesitan datos geométricos fundamentales, principalmente varias

secciones transversales a lo largo del río, y la separación entre las mismas. La geometría se ingresa mediante cotas y coordenadas de puntos de cada sección; el modelo utiliza esas cotas y la distancia entre secciones para calcular la pendiente del tramo.

En régimen permanente, cada tramo del río se modela con un caudal constante, aunque es posible introducir diferentes valores entre secciones.

Para tener en cuenta las pérdidas de energía se consideran en dos partes: el rozamiento a lo largo de la conducción (rugosidad de Manning "n") y las transiciones abruptas (contracciones o expansiones), como las que se producen cerca de puentes.

La resolución de un modelo 1D en régimen permanente implica aplicar la ecuación de energía de Bernoulli corregida por las pérdidas de fricción y de contracción/expansión.

Actualmente se usan softwares especializados para estas modelaciones, como HEC–RAS, los que calculan, para la creciente de diseño, el tirante de agua en cada sección y generan el perfil longitudinal de la superficie libre. Si se ingresan varios caudales, permiten construir curvas de gasto (relación altura-caudal), con tablas de profundidad y velocidad promedio, secciones inundadas y mapas de áreas propensas a inundación.

Es importante recordar que un modelo siempre es una simplificación de la realidad; su validez depende de la calidad de los datos, de la calibración y de la coherencia con los principios hidráulicos. La selección del modelo adecuado debe considerar la pregunta del problema a resolver, el tipo de resultados requeridos y la disponibilidad de datos.

8.7 ESTUDIOS GEOMORFOLÓGICOS

La geomorfología desempeña un rol crítico en la determinación del cauce, ya que funciona como el soporte primario del deslinde y proporciona la base física indispensable para traducir los cálculos hidrológicos en una delimitación territorial concreta.

Mientras que la hidrología aporta datos estadísticos sobre caudales, la geomorfología permite identificar las huellas persistentes que el agua deja en el terreno, tales como cambios en la textura del sedimento, escarpas de erosión, formación de barras y límites de colonización de la vegetación de las márgenes.

Estas evidencias de campo son las que expresan el rango de niveles que actúan con frecuencia suficiente para controlar la forma del lecho, permitiendo verificar que la cota de agua calculada sea coherente con el canal activo y con la planicie de inundación de recurrencia alta.

En la práctica de la ingeniería fluvial, la lectura geomorfológica se vincula directamente con el concepto de "banco lleno" (bankfull), que representa el nivel asociado al mayor estado repetitivo que el cauce puede contener antes de desbordar.

Un estudio técnico robusto no puede basarse únicamente en promedios estadísticos; debe incluir una verificación geomorfológica que asegure que la línea de ribera adoptada guarde

relación con los procesos de erosión y depósito recientes, evitando que eventos extraordinarios o errores de modelación desplacen el límite dominial de forma arbitraria.

La importancia de la geomorfología se vuelve aún más evidente en sistemas complejos como los ríos trenzados o anastomosados, donde el cauce no es un canal único, sino una red móvil de múltiples brazos e islas, que cambian con cada crecida.

En este sentido, la misma norma que remite al cálculo hidrológico para determinar la línea de ribera estipula explícitamente que los ríos y los lagos están conformados por el agua, la playa y el lecho por donde corre, reconociéndose así que, si bien el agua y el cauce son dos elementos que son individualizables, ninguno tiene primacía sobre los otros en cuanto conforman una unidad natural que es el río (Cano, 1988, vol. I, p. II-40); y por tanto sería un equívoco omitir la consideración física de esos otros elementos y atender solamente el nivel caudal de agua; debe darse un análisis integrado, en el que la creciente de diseño tiene una importancia significativa pero no excluyente de los otros elementos como el lecho físico constatable en el terreno.

En casos como los ríos divagantes, trenzados o anastomosados, que se caracterizan por poca estabilidad en su forma y fenómenos de migración lateral frecuentes dentro de un cauce físico determinado en un área más extensa, el análisis geomorfológico es la herramienta principal para delimitar un corredor de movilidad fluvial, identificando el espacio dinámico que el río ocupa habitualmente y diferenciándolo de las áreas de dominio privado que solo se anegan en crecidas excepcionales.

Mediante el estudio de imágenes satelitales históricas y la identificación de indicadores morfológicos (como la granulometría y la edad de la vegetación ribereña), se pueden distinguir los "brazos de río activos" al cauce amplio del río, por donde pueden moverse estos brazos, incluso en ausencia de series hidrométricas extensas.

Incluso en los ríos regulados artificialmente, la geomorfología mantiene un papel de control esencial. Aunque la construcción de presas altere el hidrograma, el agua sigue escurriendo por un cauce natural preexistente que conserva sus meandros y terrazas, por lo que la categoría jurídica de río se mantiene invariable. La geomorfología permite documentar cómo la regulación ha modificado el cauce con el tiempo, detectando procesos como el estrechamiento del brazo activo o la colonización vegetal de las márgenes, lo que resulta vital para ajustar la relación entre los caudales erogados y las cotas de agua actuales.

Por otro lado, los ríos trenzados o anastomosados presentan desafíos adicionales debido a su alta movilidad y a la existencia de múltiples brazos que cambian con cada crecida. En estos sistemas, el análisis geomorfológico es crítico para delimitar un corredor de movilidad fluvial que incluya los canales y barras susceptibles de ser inundados habitualmente. En lugar de una cota fija y estática, se busca identificar el espacio donde el río se desplaza naturalmente, utilizando indicadores físicos como la edad de la vegetación y la granulometría del terreno para diferenciar el lecho activo de las áreas adyacentes de dominio privado.

8.8 DELIMITACIÓN CARTOGRÁFICA Y DESLINDE

Una vez obtenidos los tirantes y cotas de lámina de agua en las secciones modeladas, la demarcación cartográfica de la línea de ribera deja de ser un "dibujo" y pasa a ser la materialización planimétrica de un límite con efectos dominiales y administrativos.

En términos técnicos, la línea de ribera es el lugar geométrico donde una cota hidráulica, adoptada como condición de diseño, intercepta el terreno representado por la cartografía de base; en términos jurídicos, se trata de un deslinde entre dominio público hídrico y dominio privado, que -como se analiza *supra*- no solo define la esfera de bajo administración estatal inalienable, sino que además condiciona los límites y mensuras de los predios ribereños.

En doctrina y práctica técnica se distingue con claridad entre definición (concepto legal), determinación (proceso técnico que fija caudales/cotas) y delimitación (tarea técnico-legal de trazado y demarcación en terreno y en documento cartográfico).

En el nivel básico, la confiabilidad cartográfica comienza por el marco de referencia geodésico. Toda línea de ribera debe estar expresada en un sistema de coordenadas y un datum oficialmente identificados, y con un datum vertical explícito cuando se trabaja con cotas, porque el trazado deriva de comparaciones entre elevaciones del terreno y de la lámina de agua.

En estándares internacionales de información geográfica, la calidad de un producto espacial se describe y evalúa mediante componentes como:

- Exactitud posicional es la exactitud de la posición de los objetos geográficos dentro de un sistema de referencia espacial (datum/proyección y, si aplica, referencia vertical). Se refiere a qué tan cerca están las coordenadas (X, Y y eventualmente Z) de los valores "verdaderos" o aceptados como tales (por ejemplo, puntos de control, mediciones topográficas, GNSS, etc.).
- Completitud describe la presencia o ausencia de objetos, atributos y/o relaciones que deberían estar en el conjunto de datos según la especificación. Se suele descomponer en omisión (faltan ítems) y comisión (sobran ítems). Aplicado a una línea de ribera: omisión sería dejar tramos sin delinear donde deberían existir; comisión sería dibujar segmentos "extra" que no corresponden al fenómeno representado por el criterio adoptado.
- Consistencia lógica es el grado de adherencia a reglas lógicas de la estructura de datos, atributos y relaciones. Esas reglas se documentan típicamente en la especificación técnica y/o el catálogo de objetos (por ejemplo: no se permiten auto-intersecciones, los polígonos no pueden solaparse, no deben existir "huecos" no válidos, conectividad de ejes, reglas topológicas, dominios válidos de atributos). En términos prácticos: una línea de ribera puede estar "bien ubicada" (buena exactitud posicional) pero ser lógicamente inconsistente si tiene

geometrías inválidas, segmentos duplicados, saltos, topología rota o atributos fuera de dominio.

- Linaje o procedencia es la historia documentada del dato: de dónde proviene, quién lo produjo, cuándo, con qué insumos (fuentes) y qué procesos (etapas/algoritmos/decisiones) se aplicaron para obtenerlo. En metadatos geoespaciales, el linaje suele organizarse como fuentes más los pasos de proceso. Para una línea de ribera, el linaje debería permitir reconstruir (y auditar) la cadena completa: MDT usado (resolución, fecha, datum), secciones y relevamientos, modelo hidráulico/escenario, método de interpolación de lámina de agua, criterio de extracción del contorno, ediciones manuales justificadas y controles de calidad realizados.

La dimensión legal exige, además, un cierre procedimental que convierta el resultado técnico en un límite o restricción con publicidad y control estatal.

La delimitación de la línea de ribera, por ser un límite territorial jurídicamente relevante, debe ser plasmado en un documento cartográfico ejecutado por profesional habilitado y aprobado por la autoridad de aplicación correspondiente.

También se establece la obligación de consignar la demarcación en el plano de mensura de las propiedades ribereñas, y exigir visado de la autoridad hídrica antes de que el levantamiento parcelario sea considerado por la autoridad catastral.

8.9 ESTUDIO LINEA DE RIBERA RÍO MENDOZA

8.9.1 Introducción

La Dirección de Gestión Hídrica del Departamento General de Irrigación (DGI), en el año 2006, realizó el estudio técnico denominado "ESTUDIO DE LÍNEA DE RIBERA DEL RÍO MENDOZA", el que derivó definitivamente en la declaración del deslinde de ribera de los Sectores I y III del Río Mendoza, por la Resolución 1164/06 de la Superintendencia General de Irrigación.

Este trabajo se realizó a lo largo de la zona de influencia del Río Mendoza, el cual, en principio, fue dividido en distintos sectores, respondiendo a la existencia de una serie de obras de infraestructuras, distintas zonas morfológicas, varias tipologías fluviales, etc.

Los sectores definidos se presentan en el Cuadro 8.5

Cuadro 8.5 Sectores Río Mendoza

Sector I	aguas arriba de la Presa Potrerillos	No regulado
Sector II	el perilago del Embalse Potrerillos y zona de presa	
Sector III	aguas abajo de la Presa Potrerillos, hasta la curva de la Media Luna	Regulado
Sector IV	desde la curva de la Media Luna hasta el Dique Cipolletti	Regulado
Sector V	aguas abajo del Dique Cipolletti	Regulado
Sector VI	arroyos afluentes al río	No regulado

Fuente: Elaboración propia

Puede verse que estos estudios se realizaron dentro del período 1968-2015, en el cual coexistían las modificaciones introducidas por la Ley 17.711 al CC - Art. 2340 inc. 4 con el criterio de las "crecidas medias ordinarias" (CMO), por un lado; y el CC - Art. 2577 con las "más altas aguas en su estado normal". En tal marco, el deslinde se realizó en base a la determinación de las más altas aguas en su estado normal, aplicándose una metodología de análisis de recurrencia para establecer la crecida normal en base al vínculo con el tiempo de recurrencia de 2 años (TR2).

Como se explicó, en ríos con distribuciones muy asimétricas o sujetos a cambios significativos en el régimen hidrológico, la media de las crecidas que estipula la actual legislación y la crecida de recurrencia 2 años pueden diferir notablemente. Se presenta a continuación el procedimiento de cálculo para cada uno de ellos, permitiendo una comparación entre ambos sistemas.

8.9.2 Crecida diseño Sector I

A la fecha del estudio y de acuerdo a la publicación Estadística Hidrológica de la República Argentina - Edición 2004, de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, la Estación Guido (Código 1413) presentaba el registro de caudales medios mensuales (QMM) desde el año hidrológico 1956/1957 al 2003/2004. Esta sección de aforos fue elegida como representativa de los caudales de este Sector I, ya que se encuentra dentro de la traza del río en este sector.

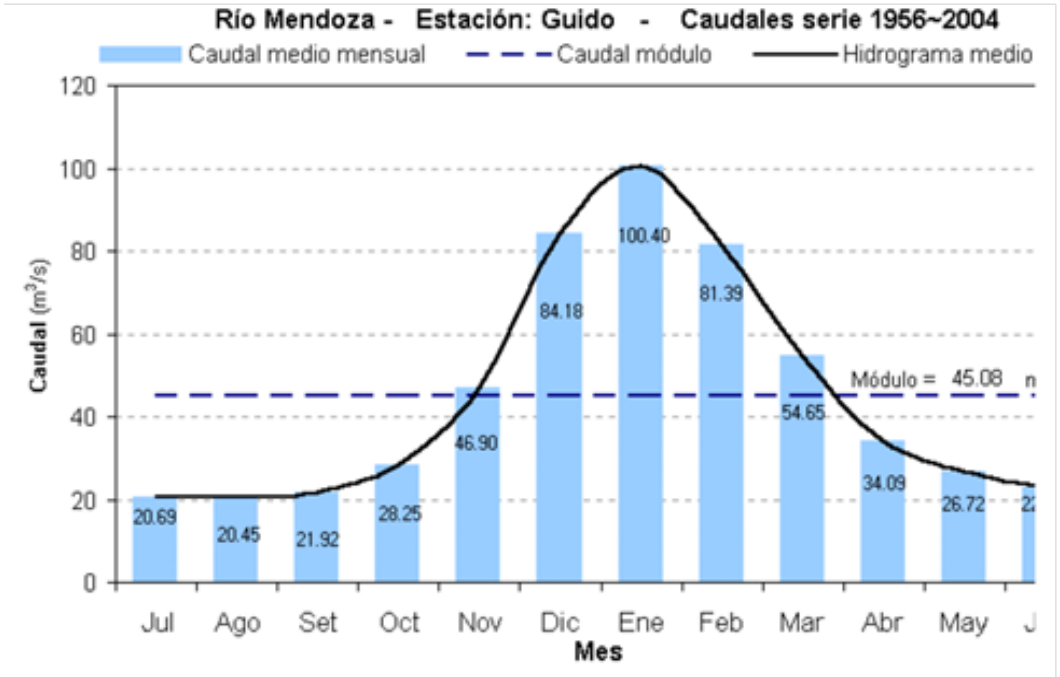
El DGI contaba con los valores de caudales medios diarios (QMD) para el mismo período (48 años hidrológicos), siendo ésta la serie utilizada para todos los cálculos.

Es importante recordar que para los ríos de montaña de la República Argentina, con régimen simple, termonival, el año hidrológico o temporada, se define entre inicios del mes

de julio de un año y el final de junio del año siguiente. Esto se debe a que las crecientes, y los correspondientes caudales máximos, se producen en la temporada estival, generalmente entre los meses de diciembre de un año y enero/febrero del siguiente (ver Cuadro 6).

La serie de máximos caudales medios diarios (MQMD) se muestra en el Cuadro 8.7

Cuadro 8.6 **Caudales Medios Mensuales - Estación Guido**



Fuente: Elaboración propia

8.9.2.1 Creciente Normal

Para determinar la creciente normal del Sector I del Río Mendoza, a la serie de MQMD se ajustaron seis funciones de probabilidad teóricas: Normal "$F_{N(q)}$", Log-Normal "$F_{LN(q)}$", Pearson III "$F_{p(q)}$", Log-Pearson III "$F_{LP(q)}$", Logística "$F_{L(q)}$" y Gumbel "$F_{G(q)}$".

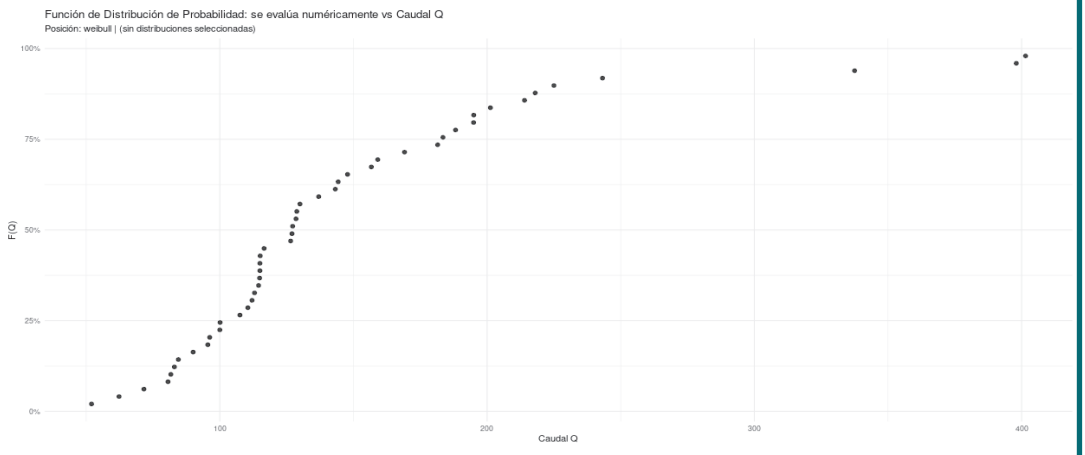
La función de frecuencia acumulada empírica "$F_{(q)}$" de los MQMD se estimó utilizando la metodología de Weibull aplicada a la serie de valores ordenados en forma creciente (ver Cuadros 8.7 y 8.8).

Cuadro 8.7 Máximo Caudal Medio Diario (MQMD) en Guido

n	TEMPORADA	DATOS	ORDENADOS	F(q)	n	TEMPORADA	DATOS	ORDENADOS	F(q)
1	1956-57	90.0 m³/s	52.0 m³/s	2.0%	25	1980-81	181.5 m³/s	127.3 m³/s	51.0%
2	1957-58	115.0 m³/s	62.3 m³/s	4.1%	26	1981-82	115.0 m³/s	128.5 m³/s	53.1%
3	1958-59	84.5 m³/s	71.6 m³/s	6.1%	27	1982-83	398.0 m³/s	128.8 m³/s	55.1%
4	1959-60	113.0 m³/s	80.6 m³/s	8.2%	28	1983-84	195.0 m³/s	130.0 m³/s	57.1%
5	1960-61	114.5 m³/s	81.7 m³/s	10.2%	29	1984-85	337.5 m³/s	137.0 m³/s	59.2%
6	1961-62	127.0 m³/s	83.0 m³/s	12.2%	30	1985-86	128.5 m³/s	143.2 m³/s	61.2%
7	1962-63	71.6 m³/s	84.5 m³/s	14.3%	31	1986-87	243.2 m³/s	144.3 m³/s	63.3%
8	1963-64	214.0 m³/s	90.0 m³/s	16.3%	32	1987-88	401.5 m³/s	147.8 m³/s	65.3%
9	1964-65	62.3 m³/s	95.5 m³/s	18.4%	33	1988-89	137.0 m³/s	156.7 m³/s	67.3%
10	1965-66	156.7 m³/s	96.2 m³/s	20.4%	34	1989-90	112.1 m³/s	159.1 m³/s	69.4%
11	1966-67	100.0 m³/s	100.0 m³/s	22.4%	35	1990-91	144.3 m³/s	169.1 m³/s	71.4%
12	1967-68	80.6 m³/s	100.1 m³/s	24.5%	36	1991-92	201.3 m³/s	181.5 m³/s	73.5%
13	1968-69	100.1 m³/s	107.5 m³/s	26.5%	37	1992-93	116.6 m³/s	183.5 m³/s	75.5%
14	1969-70	128.8 m³/s	110.5 m³/s	28.6%	38	1993-94	127.3 m³/s	188.2 m³/s	77.6%
15	1970-71	52.0 m³/s	112.1 m³/s	30.6%	39	1994-95	195.0 m³/s	195.0 m³/s	79.6%
16	1971-72	95.5 m³/s	113.0 m³/s	32.7%	40	1995-96	115.1 m³/s	195.0 m³/s	81.6%
17	1972-73	225.0 m³/s	114.5 m³/s	34.7%	41	1996-97	81.7 m³/s	201.3 m³/s	83.7%
18	1973-74	126.5 m³/s	114.9 m³/s	36.7%	42	1997-98	159.1 m³/s	214.0 m³/s	85.7%
19	1974-75	147.8 m³/s	115.0 m³/s	38.8%	43	1998-99	96.2 m³/s	218.0 m³/s	87.8%
20	1975-76	110.5 m³/s	115.0 m³/s	40.8%	44	1999-00	107.5 m³/s	225.0 m³/s	89.8%
21	1976-77	83.0 m³/s	115.1 m³/s	42.9%	45	2000-01	143.2 m³/s	243.2 m³/s	91.8%
22	1977-78	183.5 m³/s	116.6 m³/s	44.9%	46	2001-02	188.2 m³/s	337.5 m³/s	93.9%
23	1978-79	218.0 m³/s	126.5 m³/s	46.9%	47	2002-03	169.1 m³/s	398.0 m³/s	95.9%
24	1979-80	130.0 m³/s	127.0 m³/s	49.0%	48	2003-04	114.9 m³/s	401.5 m³/s	98.0%

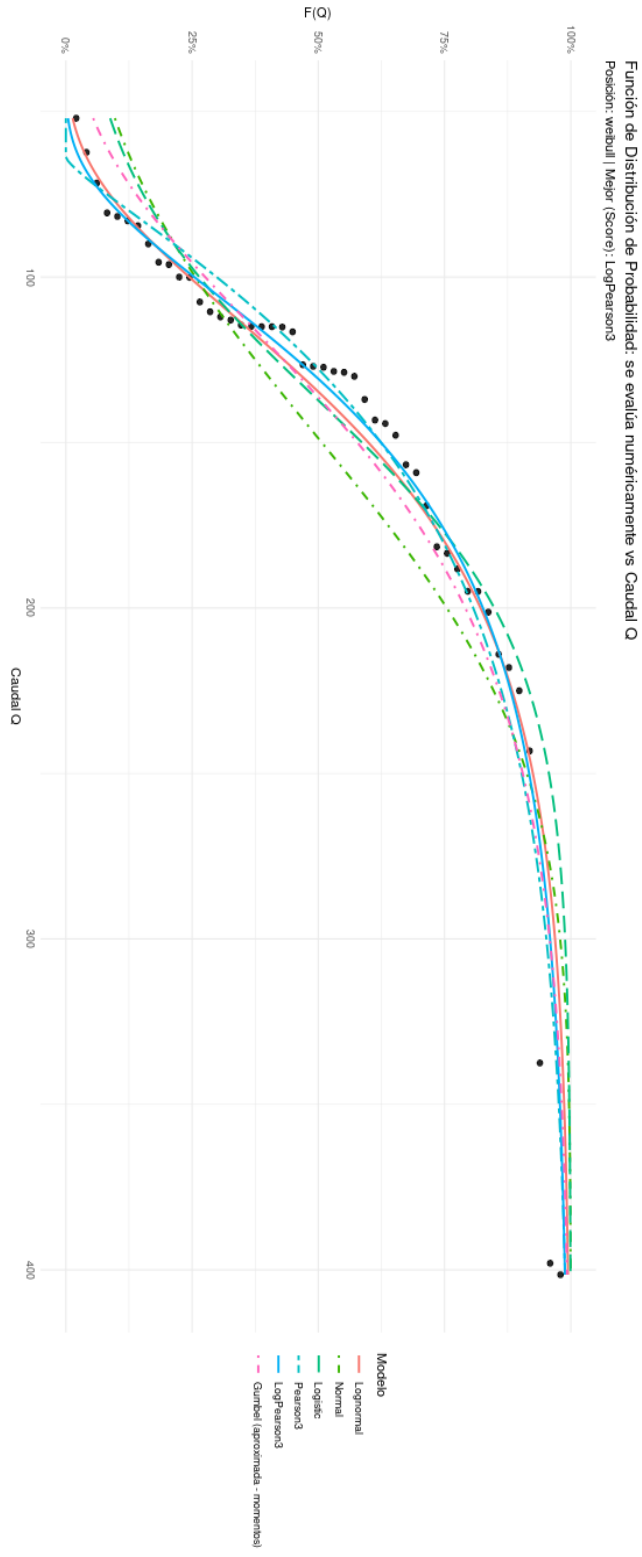
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.8 Frecuencia Acumulada Empírica de MQMD



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.9 Funciones Distribución de Probabilidad



Fuente: Elaboración propia

Para el test de bondad de ajuste se utilizó la metodología de Kolmogorov–Smirnov, dando como resultados para la evaluación:

$$\alpha = 5\% \rightarrow C_\alpha = 1.358$$

$$N = 48 \rightarrow k_N = 7.064$$

$$D_\alpha = 0.1922$$

En el Cuadro 8.7 se muestran, además de la serie de caudales ordenados y su frecuencias acumuladas empíricas, los resultados de la aplicación de todas las fórmulas previamente vistas para las 6 funciones de probabilidades, sus correspondientes diferencias $D_{0n} = D_{qn} - D_{0(qn)}$; el valor del estadístico $D_0\, max = maximo \mid D_{0n} \mid$ y la verificación si se acepta, o rechaza, la hipótesis nula "H0".

En el Cuadro 8.9 se muestran las funciones teóricas utilizadas.

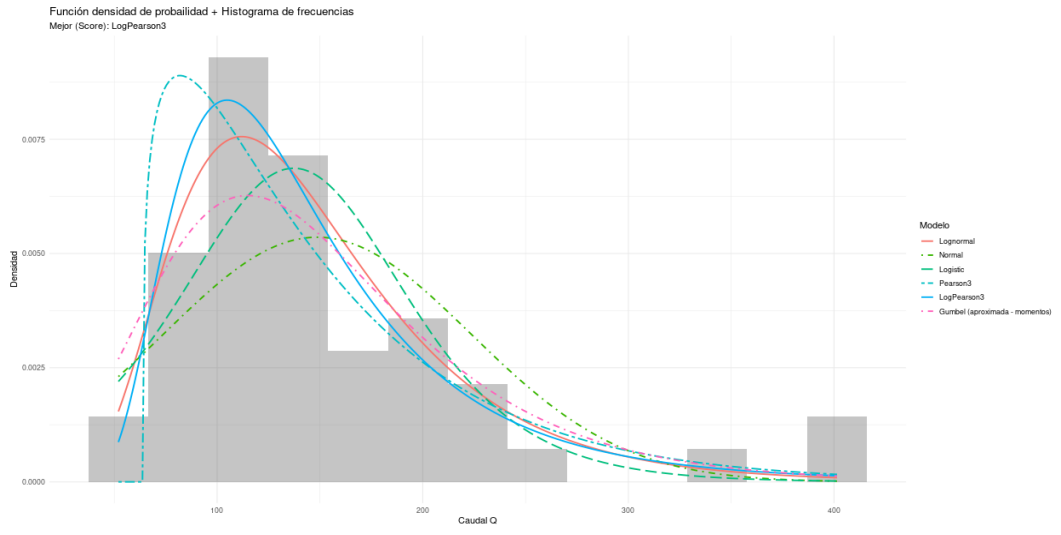
De esto se desprende que, en todas las funciones de probabilidad se han "aceptado" las hipótesis nulas. La función que tiene menor $D_0\, max$ es la función log-Pearson III, con un valor de $D_{LP} = 0.0698$, por lo cual se utiliza esta función para el cálculo del caudal para un tiempo de recurrencia de 2 años:

Utilizando las fórmulas correspondientes a la inversa de log-Pearson III, se obtiene como resultado que:

$$F_{(q)} = 50\% \rightarrow TR = 2\ años \rightarrow q_{TR2} = 129.8 \frac{m^3}{s}$$

También es importante, al menos conceptualmente, ver la gráfica comparativa de densidades entre el histograma de caudales evaluados y las funciones de probabilidad aplicadas (ver Cuadro 8.10).

Cuadro 8.10 **Histograma de datos y Funciones - Densidad Probabilidad**



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8.11 Crecientes de diseño Sector I - Resultados

Mínimo = 52,0 m³/s	μ = 148,7 m³/s	Media = 4,9027	μ = 148,7 m³/s	Media = 4,9027
Máximo = 401,5 m³/s	σ = 75,3 m³/s	Desv.St. = 0,4345	σ = 75,3 m³/s	Desv.St. = 0,4345
N = 48	CA = 1,892		CA = 1,892	CA1 = 0,5115
Promedio = 148,7 m³/s			α = 1,1179	α1 = 15,2877
Desviación Est. = 75,3 m³/s			β = 71,1992	β1 = 0,1111
Coef. Asimetría = 1,892			X0 = 69,1218	X1 = 3,2038
Significancia: α = 5,0%	D_N max = 0,1696	D_{LN} max = 0,1037	D_P max = 0,0994	D_{LP} max = 0,0698
Valor Crítico: Dα = 0,1922	Se hacepta H0	Se hacepta H0	Se hacepta H0	Se hacepta H0

n	ORDENADOS	$F_{(q)}$	Normal		Lognormal			Pearson III			Log Pearson III		
			$F_{N(q)}$	D	y=ln(q)	$F_{LN(q)}$	D	t=q-X0	$F_{P(t)}$	D	t1=y-X1	$F_{P(t1)}$	D
1	52,0 m³/s	2,04%	9,94%	0,0790	3,9512	1,43%	0,0061				0,7475	0,31%	0,0173
2	62,3 m³/s	4,08%	12,55%	0,0847	4,1320	3,80%	0,0028				0,9282	1,98%	0,0210
3	71,6 m³/s	6,12%	15,28%	0,0916	4,2711	7,30%	0,0118	2,4782	2,18%	0,0394	1,0673	5,50%	0,0063
4	80,6 m³/s	8,16%	18,28%	0,1011	4,3895	11,88%	0,0371	11,4782	11,32%	0,0316	1,1857	10,77%	0,0260
5	81,7 m³/s	10,20%	18,66%	0,0846	4,4029	12,50%	0,0230	12,5682	12,43%	0,0223	1,1992	11,51%	0,0131
6	83,0 m³/s	12,24%	19,13%	0,0689	4,4188	13,27%	0,0103	13,8782	13,76%	0,0151	1,2151	12,43%	0,0019
7	84,5 m³/s	14,29%	19,68%	0,0540	4,4368	14,18%	0,0011	15,3782	15,26%	0,0098	1,2330	13,52%	0,0077
8	90,0 m³/s	16,33%	21,77%	0,0544	4,4998	17,69%	0,0136	20,8782	20,66%	0,0433	1,2961	17,73%	0,0141
9	95,5 m³/s	18,37%	23,98%	0,0561	4,5591	21,46%	0,0309	26,3782	25,81%	0,0744	1,3554	22,23%	0,0386
10	96,2 m³/s	20,41%	24,28%	0,0387	4,5666	21,96%	0,0155	27,0982	26,47%	0,0606	1,3629	22,83%	0,0242
11	100,0 m³/s	22,45%	25,88%	0,0343	4,6052	24,67%	0,0223	30,8782	29,83%	0,0738	1,4014	26,02%	0,0357
12	100,1 m³/s	24,49%	25,92%	0,0143	4,6062	24,75%	0,0026	30,9782	29,92%	0,0543	1,4024	26,11%	0,0162
13	107,5 m³/s	26,53%	29,21%	0,0268	4,6777	30,23%	0,0370	38,3982	36,15%	0,0962	1,4739	32,41%	0,0588
14	110,5 m³/s	28,57%	30,58%	0,0201	4,7050	32,46%	0,0388	41,3782	38,51%	0,0994	1,5013	34,91%	0,0634
15	112,1 m³/s	30,61%	31,31%	0,0070	4,7189	33,62%	0,0301	42,9282	39,71%	0,0910	1,5152	36,20%	0,0559
16	113,0 m³/s	32,65%	31,76%	0,0089	4,7274	34,33%	0,0168	43,8782	40,44%	0,0778	1,5236	36,99%	0,0434
17	114,5 m³/s	34,69%	32,47%	0,0222	4,7406	35,45%	0,0076	45,3782	41,56%	0,0687	1,5368	38,22%	0,0353
18	114,9 m³/s	36,73%	32,65%	0,0408	4,7438	35,73%	0,0100	45,7532	41,84%	0,0511	1,5401	38,53%	0,0179
19	115,0 m³/s	38,78%	32,71%	0,0606	4,7449	35,83%	0,0295	45,8782	41,94%	0,0316	1,5412	38,63%	0,0014
20	115,0 m³/s	40,82%	32,71%	0,0810	4,7449	35,83%	0,0499	45,8782	41,94%	0,0112	1,5412	38,63%	0,0219
21	115,1 m³/s	42,86%	32,76%	0,1009	4,7459	35,91%	0,0695	45,9882	42,02%	0,0084	1,5421	38,72%	0,0414
22	116,6 m³/s	44,90%	33,46%	0,1143	4,7584	36,99%	0,0791	47,4382	43,08%	0,0182	1,5546	39,90%	0,0500
23	126,5 m³/s	46,94%	38,40%	0,0854	4,8402	44,28%	0,0265	57,3782	49,91%	0,0298	1,6365	47,61%	0,0067
24	127,0 m³/s	48,98%	38,65%	0,1033	4,8442	44,64%	0,0434	57,8782	50,24%	0,0126	1,6404	47,98%	0,0100
25	127,3 m³/s	51,02%	38,78%	0,1224	4,8462	44,83%	0,0619	58,1382	50,40%	0,0062	1,6425	48,17%	0,0285
26	128,5 m³/s	53,06%	39,41%	0,1365	4,8559	45,71%	0,0735	59,3782	51,19%	0,0187	1,6522	49,08%	0,0398
27	128,8 m³/s	55,10%	39,57%	0,1554	4,8583	45,93%	0,0918	59,6782	51,38%	0,0372	1,6545	49,30%	0,0581
28	130,0 m³/s	57,14%	40,18%	0,1696	4,8675	46,77%	0,1037	60,8782	52,13%	0,0501	1,6638	50,16%	0,0698
29	137,0 m³/s	59,18%	43,82%	0,1537	4,9200	51,59%	0,0760	67,8782	56,30%	0,0288	1,7162	54,97%	0,0421
30	143,2 m³/s	61,22%	47,08%	0,1415	4,9642	55,63%	0,0560	74,0752	59,70%	0,0152	1,7605	58,90%	0,0232
31	144,3 m³/s	63,27%	47,65%	0,1562	4,9718	56,31%	0,0695	75,1582	60,27%	0,0300	1,7680	59,56%	0,0371
32	147,8 m³/s	65,31%	49,51%	0,1579	4,9959	58,49%	0,0682	78,6782	62,06%	0,0324	1,7921	61,62%	0,0368
33	156,7 m³/s	67,35%	54,22%	0,1312	5,0543	63,64%	0,0370	87,5782	66,26%	0,0109	1,8506	66,42%	0,0093
34	159,1 m³/s	69,39%	55,48%	0,1391	5,0695	64,94%	0,0445	89,9682	67,31%	0,0208	1,8657	67,60%	0,0179
35	169,1 m³/s	71,43%	60,67%	0,1075	5,1305	70,00%	0,0143	99,9832	71,37%	0,0006	1,9268	72,14%	0,0071
36	181,5 m³/s	73,47%	66,84%	0,0663	5,2013	75,40%	0,0193	112,3782	75,72%	0,0225	1,9975	76,87%	0,0340
37	183,5 m³/s	75,51%	67,80%	0,0771	5,2122	76,19%	0,0068	114,3782	76,36%	0,0085	2,0085	77,56%	0,0205
38	188,2 m³/s	77,55%	70,00%	0,0755	5,2375	77,95%	0,0040	119,0812	77,80%	0,0025	2,0338	79,08%	0,0153
39	195,0 m³/s	79,59%	73,04%	0,0655	5,2727	80,28%	0,0069	125,8282	79,72%	0,0013	2,0690	81,07%	0,0148
40	195,0 m³/s	81,63%	73,07%	0,0857	5,2730	80,29%	0,0134	125,8782	79,73%	0,0190	2,0692	81,09%	0,0055
41	201,3 m³/s	83,67%	75,74%	0,0794	5,3045	82,25%	0,0143	132,1282	81,36%	0,0231	2,1008	82,75%	0,0092
42	214,0 m³/s	85,71%	80,71%	0,0501	5,3660	85,68%	0,0003	144,8782	84,30%	0,0142	2,1622	85,68%	0,0004
43	218,0 m³/s	87,76%	82,13%	0,0562	5,3845	86,62%	0,0113	148,8782	85,12%	0,0264	2,1807	86,48%	0,0128
44	225,0 m³/s	89,80%	84,45%	0,0534	5,4161	88,13%	0,0167	155,8782	86,46%	0,0334	2,2123	87,76%	0,0203
45	243,2 m³/s	91,84%	89,53%	0,0231	5,4938	91,32%	0,0052	174,0682	89,41%	0,0243	2,2901	90,52%	0,0132
46	337,5 m³/s	93,88%	99,39%	0,0551	5,8216	98,28%	0,0440	268,3782	97,07%	0,0319	2,6178	97,15%	0,0327
47	398,0 m³/s	95,92%	99,95%	0,0404	5,9865	99,37%	0,0345	328,8782	98,72%	0,0280	2,7827	98,55%	0,0263
48	401,5 m³/s	97,96%	99,96%	0,0200	5,9951	99,40%	0,0144	332,3382	98,78%	0,0082	2,7913	98,60%	0,0064

Mínimo = 52,0 m³/s	μ = 148,7 m³/s	μ = 148,7 m³/s	μ = 148,7 m³/s
Máximo = 401,5 m³/s	σ = 75,3 m³/s	σ = 75,3 m³/s	σ = 75,3 m³/s
N = 48	μy1 = 0,577	μy1 = 0,548	s = 41,5041
Promedio = 148,7 m³/s	σy1 = 1,2825	σy1 = 1,1696	
Desviación Est. = 75,3 m³/s	α = 0,0170	α = 0,0155	
Coef. Asimetría = 1,892	β = 114,8364	u = 113,4639	

Significancia: α = 5,0%	D_{GA} max = 0,1095	D_{GE} max = 0,1100	D_L max = 0,1823
Valor Crítico: Dα = 0,1922	Se hacepta H0	Se hacepta H0	Se hacepta H0

n	ORDENADOS	$F_{(q)}$	Gumbel Aprox		Gumbel Exacto			Logistica	
			$F_{Ga(q)}$	D	y1	$F_{Ge(q)}$	D	$F_{L(q)}$	D
1	52,0 m³/s	2,04%	5,41%	0,0337	-1,3589	7,44%	0,0540	8,86%	0,0682
2	62,3 m³/s	4,08%	8,65%	0,0457	-1,1627	10,92%	0,0684	11,08%	0,0700
3	71,6 m³/s	6,12%	12,38%	0,0626	-1,0272	14,71%	0,0859	13,49%	0,0737
4	80,6 m³/s	8,16%	16,66%	0,0850	-0,9185	18,90%	0,1073	16,23%	0,0807
5	81,7 m³/s	10,20%	17,22%	0,0702	-0,8252	19,43%	0,0923	16,59%	0,0639
6	83,0 m³/s	12,24%	17,90%	0,0566	-0,7420	20,08%	0,0784	17,03%	0,0479
7	84,5 m³/s	14,29%	18,70%	0,0441	-0,6657	20,84%	0,0655	17,55%	0,0326
8	90,0 m³/s	16,33%	21,72%	0,0540	-0,5946	23,70%	0,0737	19,55%	0,0322
9	95,5 m³/s	18,37%	24,90%	0,0654	-0,5274	26,66%	0,0829	21,72%	0,0335
10	96,2 m³/s	20,41%	25,33%	0,0492	-0,4633	27,06%	0,0665	22,01%	0,0161
11	100,0 m³/s	22,45%	27,59%	0,0514	-0,4014	29,15%	0,0670	23,62%	0,0117
12	100,1 m³/s	24,49%	27,65%	0,0316	-0,3414	29,21%	0,0472	23,66%	0,0083
13	107,5 m³/s	26,53%	32,21%	0,0568	-0,2828	33,40%	0,0687	27,04%	0,0051
14	110,5 m³/s	28,57%	34,07%	0,0550	-0,2254	35,09%	0,0652	28,48%	0,0009
15	112,1 m³/s	30,61%	35,04%	0,0443	-0,1687	35,98%	0,0537	29,25%	0,0137
16	113,0 m³/s	32,65%	35,64%	0,0298	-0,1126	36,52%	0,0387	29,72%	0,0293
17	114,5 m³/s	34,69%	36,58%	0,0188	-0,0570	37,38%	0,0269	30,48%	0,0421
18	114,9 m³/s	36,73%	36,81%	0,0008	-0,0014	37,59%	0,0086	30,67%	0,0606
19	115,0 m³/s	38,78%	36,89%	0,0189	0,0541	37,67%	0,0111	30,74%	0,0804
20	115,0 m³/s	40,82%	36,89%	0,0393	0,1097	37,67%	0,0315	30,74%	0,1008
21	115,1 m³/s	42,86%	36,96%	0,0590	0,1657	37,73%	0,0513	30,79%	0,1206
22	116,6 m³/s	44,90%	37,87%	0,0703	0,2222	38,56%	0,0634	31,54%	0,1335
23	126,5 m³/s	46,94%	44,05%	0,0289	0,2793	44,19%	0,0275	36,93%	0,1001
24	127,0 m³/s	48,98%	44,36%	0,0462	0,3372	44,47%	0,0451	37,21%	0,1177
25	127,3 m³/s	51,02%	44,52%	0,0650	0,3961	44,62%	0,0640	37,36%	0,1366
26	128,5 m³/s	53,06%	45,28%	0,0778	0,4561	45,31%	0,0775	38,06%	0,1500
27	128,8 m³/s	55,10%	45,46%	0,0964	0,5175	45,48%	0,0963	38,23%	0,1687
28	130,0 m³/s	57,14%	46,19%	0,1095	0,5805	46,14%	0,1100	38,91%	0,1823
29	137,0 m³/s	59,18%	50,38%	0,0880	0,6453	49,97%	0,0921	42,99%	0,1619
30	143,2 m³/s	61,22%	53,97%	0,0726	0,7121	53,26%	0,0797	46,68%	0,1454
31	144,3 m³/s	63,27%	54,58%	0,0869	0,7813	53,82%	0,0945	47,33%	0,1594
32	147,8 m³/s	65,31%	56,54%	0,0877	0,8531	55,62%	0,0968	49,45%	0,1586
33	156,7 m³/s	67,35%	61,26%	0,0609	0,9281	60,00%	0,0735	54,79%	0,1255
34	159,1 m³/s	69,39%	62,47%	0,0692	1,0066	61,13%	0,0826	56,22%	0,1317
35	169,1 m³/s	71,43%	67,25%	0,0417	1,0892	65,62%	0,0581	62,04%	0,0939
36	181,5 m³/s	73,47%	72,53%	0,0094	1,1767	70,65%	0,0282	68,78%	0,0469
37	183,5 m³/s	75,51%	73,31%	0,0220	1,2697	71,40%	0,0411	69,81%	0,0570
38	188,2 m³/s	77,55%	75,09%	0,0246	1,3695	73,12%	0,0444	72,14%	0,0541
39	195,0 m³/s	79,59%	77,46%	0,0213	1,4773	75,43%	0,0416	75,29%	0,0431
40	195,0 m³/s	81,63%	77,48%	0,0416	1,5948	75,45%	0,0619	75,31%	0,0632
41	201,3 m³/s	83,67%	79,50%	0,0417	1,7246	77,44%	0,0623	78,00%	0,0567
42	214,0 m³/s	85,71%	83,14%	0,0257	1,8698	81,08%	0,0463	82,82%	0,0289
43	218,0 m³/s	87,76%	84,16%	0,0360	2,0355	82,11%	0,0564	84,15%	0,0361
44	225,0 m³/s	89,80%	85,81%	0,0399	2,2290	83,80%	0,0600	86,27%	0,0353
45	243,2 m³/s	91,84%	89,38%	0,0246	2,4632	87,52%	0,0431	90,69%	0,0115
46	337,5 m³/s	93,88%	97,77%	0,0390	2,7618	96,97%	0,0309	98,95%	0,0508
47	398,0 m³/s	95,92%	99,20%	0,0328	3,1779	98,80%	0,0289	99,75%	0,0384
48	401,5 m³/s	97,96%	99,25%	0,0129	3,8815	98,87%	0,0091	99,77%	0,0181

Fuente: Elaboración propia

8.9.2.2 Actualización al 2025

La legislación argentina actual escoge el criterio de establecer que la línea de ribera delimita el dominio público a partir del promedio de las máximas crecidas ordinarias (PMCO).

Inicialmente se comentó que la línea de ribera es una frontera "móvil" que varía según la evolución de los caudales en el tiempo. Esta movilidad se justifica desde los estudios hidrológicos, ya que todas las metodologías de crecidas de diseño (TR2 y PMCO) se basan en cálculos estadísticos sobre una serie de datos de caudales ordinarios y estas series cambian a lo largo del tiempo.

Si hoy se hiciera la actualización de la línea de ribera del Sector I del Río Mendoza, utilizando los datos de la estación Guido, para una serie de 69 años, entre 1956 a 2025, los resultados que se obtendrían son los siguientes.

8.9.2.2.1 Promedio de las Máximas Crecidas Ordinarias (PMCO)

De acuerdo a la definición discutida anteriormente, el PMCO para el Sector I del Río Mendoza es el valor de la media de la serie de caudales ordinarios, o Máximo Caudal Medio Diario anual, para el período 1956/2004. Esta serie se muestra en el Cuadro N° 8.7.

A modo de referencia, se presenta la PMCO hasta el año 2004, lo que servirá de referencia para la comparación de una actualización al 2025:

$$PMCO_{SEC\ I}^{2004} = \overline{q} = \frac{\sum_1^N q_n}{N} = \frac{\sum\ MQMD_n}{N} = 148.7\frac{m^3}{s}$$

$$PMCO_{Sec\ I}^{2025} = \overline{q} = \frac{\sum_1^{61} q_n}{61} = \frac{\sum\ MQMD_n}{61} = 142.4\frac{m^3}{s}$$

8.9.2.2.2 Creciente Normal

De igual manera, si se hiciera la actualización al año 2025 y se siguiera utilizando el criterio de la "creciente normal", para una referencia de la movilidad de la línea de ribera se verifica que también resulta la distribución Log Pearson III como la que tienen mejor ajuste, con los siguientes resultados:

$$F_{LP(q)}^{2025} = 50\% \rightarrow TR = 2\ años \rightarrow q_{TR2}^{2025} = 125.1\frac{m^3}{s}$$

8.9.2.3 Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos previamente (ver Cuadro 8.11), es evidente que la creciente de diseño es un valor que cambia a lo largo del tiempo, de acuerdo a la serie de datos que se consideren.

De esta variación se desprende que la línea de ribera es un límite dinámico, dependiendo del momento en que se determina.

Cuadro 8.12 Funciones Distribución de Probabilidad

Serie		N	PMCO	q_{TR2}
1956-57	2003-04	48 años	148.7 m^3/s	129.8 m^3/s
1956-57	2024-25	69 años	142.4 m^3/s	125.1 m^3/s

Fuente: Elaboración propia

También se observa que es un 12% menor a la PMCO, lo que no es una diferencia chica, y no se cumple lo que indican varias fuentes consultadas, donde indican que la diferencia entre la "media" (PMCO) y la "mediana" de la mejor función de distribución (q_{TR2}), es muy poca.

Se ha demostrado que, en el caso del Sector I del río Mendoza:

- √ los máximos caudales medios diarios (MQMD) no son bien representados por funciones de distribución simétricas, como la Normal, en las que el principal parámetro es la "media" o promedio de los datos, que es igual a la "mediana";
- √ la serie de MQMD es mejor representada por funciones de distribución con asimetría positiva o sesgada a la derecha (log-Pearson III, log-Normal), con muchos eventos de baja magnitud y pocos eventos extremos de alta magnitud. Por lo tanto, en series de caudales extremos, la "mediana" (caudal con 50% de probabilidad y tiempo de recurrencia de 2 años) representa mejor la normalidad de las crecientes; coincidiendo también con el "caudal formador" del cauce;
- √ de acuerdo a otros trabajos estadísticos sobre caudales y derrames anuales (volumen total erogado por un río en un año hidrológico), se puede verificar que estas series son mejor representadas por funciones de probabilidad con asimetría positiva.

8.9.3 Crecida diseño Sector III

Este sector comprende uno de los tramos del Río Mendoza, aguas abajo de la Presa Potrerillos, donde el río presenta un régimen "regulado" por el embalse.

Este tramo de río está delimitado, aguas arriba, por la Zona de Dique, inmediatamente aguas abajo del dique de materiales sueltos, que ha sido expropiada para la construcción de la presa; siendo su límite inferior la Curva de la Media Luna, cercana al Túnel 1 de la Ruta 82 (antigua Ruta Internacional). Es esta progresiva, el río deja el tramo encajonado de Cacheuta.

Por lo descripto metodológicamente, en un río regulado, la normalidad estará dada por el régimen fijado para la operación normal del embalse de regulación.

En este punto es muy importante destacar que este estudio se realizó en el año 2006, cuando el Dique Potrerillos sólo tenía 3 años de operación, lo que hizo imposible el estudio de caudales operativos históricos. Por lo tanto, se analizaron distintas demandas futuras, estimadas, para evaluar la "normalidad del escurrimiento regulado", considerado:

i. Demandas de riego, población, industrias, etc.
ii. Infiltración en el cauce del río
iii. Mantenimiento de cauce
iv. Capacidad de conducción sistema de riego
v. Operación de centrales hidroeléctricas

8.9.3.1 Demandas de riego, población, industrias, etc.

En la evaluación de los caudales para las necesidades de demanda futura del sistema de riego, dependiente del Río Mendoza a nivel del Dique Cipolletti (Cuadro 8.12), se han tenido en cuenta los siguientes considerandos:

i. a las hectáreas con Derecho Definitivo se las dotará con un coeficiente de riego de 1,0.
ii. a las hectáreas que actualmente tienen un Derecho Eventual, se las considera como con Derecho Definitivo a futuro. Por lo tanto el aumento en la dotación está dado por la relación $\frac{1}{0,8} = 1,25$.
iii. los derechos para Uso Público no aumentarán y tienen un coeficiente de riego de 1,0
iv. Se han supuesto 8.000 ha de Refuerzos de Verano, con un coeficiente de riego de 0,7
v. El Uso Poblacional se incrementará en un 70% respecto del actual, con un coeficiente de riego de 1,0.
vi. El Uso Industrial se incrementará en un 40% respecto del registro actual, con un coeficiente de riego de 1.0.

El valor "actual" hace referencia a que el análisis se realizó en el año 2006. Por lo tanto, para la demanda de riego, población, etc., se obtuvo un caudal de:

$$q_{CIP}^{R} = 105\ m^3/s$$

8.9.3.2 Infiltración en el río

De acuerdo a resultados obtenidos en diversos estudios realizados para determinar la infiltración en el tramo entre Cacheuta y el Dique Cipolletti (Estimación de la Infiltración en el Río Mendoza, Pérdidas del Caudal del Río Mendoza entre Cacheuta y Cipolletti, Estimación Infiltración Cacheuta a Cipolletti), se adoptó una infiltración a futuro de:

$$C_{INF} = 20\%$$

Para calcular los caudales que deben ser erogados por la Presa Potrerillos, los caudales necesarios en el Dique Cipolletti deben ser mayorados con el siguiente coeficiente:

$$q_{CIP} = q_{POT} * (1 - C_{INF})$$

$$q_{POT} = \frac{q_{CIP}}{1 - 20\%}$$

$$q_{POT} = 1.25 * q_{CIP}$$

Cuadro 8.13 Demanda Futuro Sistema de Riego, en Cipolletti

Derecho Definitivo	42504 ha	100%	42504 ha	1.0 L/ha/s	43 m³/s
Derecho Eventual	32068 ha	125%	40085 ha	1.0 L/ha/s	40 m³/s
Uso Público	3372 ha	100%	3372 ha	1.0 L/ha/s	3 m³/s
Refuerzos de Verano	10000 ha	80%	8000 ha	0.7 L/ha/s	6 m³/s
Uso Poblacional	7000 ha	170%	11900 ha	1.0 L/ha/s	12 m³/s
Uso Industrial	800 ha	140%	1120 ha	1.0 L/ha/s	1 m³/s
Demanda Futura a Nivel de Cipolletti					105 m³/s

Fuente: Elaboración propia

8.9.3.3 Mantenimiento del cauce

El cauce del Río Mendoza, aguas abajo del Dique Cipolletti, necesita ser mantenido para no generar inconvenientes en años hidrológicos con excedentes. Dado que la parte más problemática es la zona baja del río, hacia el norte de Gustavo André, se ha previsto erogar desde Cipolletti un caudal de:

$$q_{CIP}^{M} = 50\ m^3/s$$

8.9.3.4 Capacidad de conducción sistema de riego

El Cuadro 8.14 presenta las capacidades de conducción que poseían las distintas conducciones del sistema de riego del Río Mendoza.

Se define la capacidad de conducción del sistema con un caudal de:

$$q_{CIP}^{C} = 118\, m^3/s$$

Cuadro 8.14 Capacidad de Conducción Sistema de Riego

Conducción	Capacidad
Toma YPF	0.4 m³/s
Canal 1° Vistalba	1.6 m³/s
Canal compuertas	1.6 m³/s
Toma plantas	12.0 m³/s
Toma Margen Derecha	7.5 m³/s
Toma Matriz	90.0 m³/s
Refuerzo de Verano Tomas Directas Río	5.0 m³/s
Capacidad Sistema de Distribución	118 m³/s

Fuente: Elaboración propia

8.9.3.5 Operación de centrales hidroeléctricas

Aguas abajo de la Presa Potrerillos existen dos centrales hidroeléctricas en cascada, la de Cacheuta y la de Álvarez Condarco.

Los caudales procedentes del embalse, pasan primero por la central Cacheuta, donde ingresan a través de un canal de aducción de 80 m³/s de capacidad cuyo umbral se ubica a cota 1322.30 msnm, alimentando cuatro turbinas Francis de 30.7 MW cada una (122.90 en MW total), con unos caudales de 20 m³/s cada una. Las turbinas tienen un caudal mínimo de operación de 13 m³/s.

La central dispone también de una válvula de chorro hueco, capaz de erogar 80 m³/s, por la que se derivan los caudales en el caso de salida de operación de las turbinas, o en el caso de que la cota de embalse no permitiera la operación normal de las turbinas.

Tras pasar por las turbinas de Cacheuta, el agua vierte a una dársena de descarga y desde ésta, a través de una conducción con una capacidad de 72 m³/s, se dirige a la central de Álvarez Condarco, devolviéndose al río los caudales que lo exceden.

La central de Álvarez Condarco tiene una capacidad de generación de 52.90 MW, distribuidos en tres turbo máquinas, dos de las cuales aceptan caudales de hasta 20 m³/s (14.80 MW) y otra de 30 m³/s (23.30 MW).

Se ha considerado la situación de salida o puesta en servicio de la central Cacheuta sin disminuir la dotación de riego necesaria en Cipolletti. Para que esto ocurra, se genera durante unas horas una superposición de caudales provenientes de la operación de la central $(Q_{POT}^{H} = 80\, m^3/s)$ y la dotación de riego.

8.9.3.6 Caudales Ordinarios

Para definir los caudales ordinarios o normales de este Sector III se evaluaron las siguientes superposiciones, o simultaneidades, de funcionamiento futuro:

i. Dotación máxima de riego y caudal de mantenimiento del río:

$$q_{POT}^{1} = 1.25 * (q_{CIP}^{R} + q_{CIP}^{M}) = 1.25 * (105 + 50) m^3/s = 193\, m^3/s$$

ii. Sistema dotado a máxima capacidad y caudal de mantenimiento del río:

$$q_{POT}^{2} = 1.25 * (q_{CIP}^{C} + q_{CIP}^{M}) = 1.25 * (118 + 50) m^3/s = 210\, m^3/s$$

iii. Dotación máxima de riego y salida de servicio de central Cacheuta:

$$q_{POT}^{3} = q_{POT}^{H} + 1.25 * q_{CIP}^{R} = (80 + 1.25 * 105) m^3/s = 211\, m^3/s$$

Como resultado de los trabajos realizados, y considerando las incertidumbres a futuro y estadísticas que presentan todos estos estudios, se adoptó como creciente ordinaria para el trazado de las líneas de ribera un caudal:

$$q_{SEC\ III} = 215\, m^3/s$$

8.9.4 Demarcación Sector IV

Este sector comprende el tramo del Río Mendoza, aguas abajo de la Presa Potrerillos, donde el río presenta un régimen "regulado" por el embalse. Está delimitado por: su límite superior en la sección del río coincidente con la Curva de la Media Luna, cercana al Túnel 1 de la Ruta 82 (antigua Ruta Internacional). Es esta progresiva, el río deja el tramo encajonado de Cacheuta, iniciando un tramo aguas abajo con una morfología fluvial divagante y entrelazada. Su límite inferior es la zona de inundación del azud derivador Dique Cipolletti.

Dado el régimen regulado y las características morfológicas particulares que presenta este sector, se analizan las condiciones técnicas/legales para definir la línea de ribera actual (año 2006) en función de estas características y no de caudales históricos, como se ha evaluado en los otros dos sectores.

8.9.4.1 Morfología fluvial

En el trabajo sobre la "Limitación de la Línea de Ribera del Río Mendoza", inicialmente se presentan los antecedentes teóricos necesarios para poder clasificar cuali y cuantitativamente el tramo del Sector IV, en función de la morfología fluvial clásica, que distingue entre ríos trenzados y meandriformes.

Dado que en la naturaleza es muy raro encontrar cauces rectos y regulares, una de las dos morfologías fluviales típicas son los cauces trenzados (o con anastomosis).

Son cauces muy anchos, compuestos por una multiplicidad de cauces menores o brazos activos, entrelazados o trenzados, dejando islas (sumergibles) entre sí al unirse y separarse.

Son cauces inestables en el sentido de que una crecida puede cambiarlos considerablemente. En este sentido se dicen "divagantes" porque un brazo activo puede encontrarse tan pronto en un lugar como en otro. Su presencia se asocia a una gran capacidad de transporte sólido. Dicho de otro modo, una corriente muy cargada de sedimentos es propensa a formar un cauce trenzado. Esto ocurre, por ejemplo, en cauces de montaña con pendiente alta y sedimento grueso.

Puede mencionarse que son particularmente inestables los ríos que se desarrollan sobre conos de deyección, de piedemonte o deltas. Estas formaciones son planicies aluviales a modo de abanicos, bien sea a la salida de tramos de río encajados o bien en la desembocadura a un cuerpo de agua. Como se da una "indiferencia" o "isotropía" con respecto a la posición del cauce, éste puede experimentar grandes cambios.

La bibliografía indica una relación empírica de interés para definir qué condiciones un río forma un cauce trenzado o un cauce único meandriforme, estableciendo la una frontera entre una y otra morfología:

$$i * Q^{0.44} = 0.0116$$

$$i * Q^{0.44} > 0.0116 \Rightarrow Río\ Trenzado$$

$$i * Q^{0.44} \leq 0.0116 \Rightarrow Río\ Meandriforme$$

Siendo:

i	es la pendiente
Q	el caudal formativo

Posteriormente se aplican los conceptos teóricos al tramo bajo estudio del Sector IV, y se demuestra que tiene una tipología fluvial típica de "río trenzado", con cauces actuales o brazos vivos, que discurren dentro del cauce principal del río, entre las barrancas abruptas de margen derecha y las más chicas y suaves de margen izquierda, característica clásica de ríos aluviales o de montaña, en donde la sucesión de caudales de aguas bajas, caudales

de aguas altas y avenidas extraordinarias genera permanentes cambios en la traza o eje del cauce actual, así como importantes movimientos de los caudales sólidos involucrados en los procesos de erosión y sedimentación.

Respecto de la interacción del río con el medio, diversos estudios han demostrado que este tramo es la principal zona de recarga del acuífero, tanto de margen izquierda como de margen derecha del Río Mendoza, con influencia notable sobre el agua subterránea de la cuenca del Río Tunuyán.

Para confirmar esta clasificación fluvial cualitativa de "Río Trenzado", se demuestran en el informe los parámetros para cuantificar la ecuación ($i * Q^{0.44}$).

Como pendiente de cálculo se adoptó la pendiente media ponderada del cauce:

$$\overline{i} = 0.98\%$$

Esta pendiente fue evaluada en función de los perfiles transversales del estudio "Erosión Generalizada en el Río Mendoza, aguas debajo de la Presa Potrerillos", Informe la-230-021-2004.

En función de los resultados estudiados en esa oportunidad, para la sección de aforos de Cacheuta (ubicada inmediatamente aguas arriba del inicio del Sector IV), el caudal formativo para este tramo del río es de:

$$Q_{TR2} = 111\ m^3/s$$

Por lo tanto:

$$i * Q^{0.44} = 0098 * 111^{0.44} = 0.078 > 0.0116 \Rightarrow Río\ Trenzado$$

Es importante destacar también que hidrológicamente, existen dos tipos de escurrimientos con un movimiento netamente horizontal, el escurrimiento superficial, que es el que se aprecia a simple vista sobre la superficie terrestre, y el subsuperficial, en la primera capa no saturada del terreno o subálveo, el que termina aportando su caudal al superficial. Dada la granulometría gruesa que presenta el cauce principal, los escurrimientos subsuperficiales son muy importantes e intercambian permanentemente caudales entre los distintos brazos vivos del río.

8.9.4.2 Delimitación cartográfica

La variabilidad de este tramo del curso del Río Mendoza en el tiempo se evaluó mediante una serie histórica de imágenes disponibles y al solo efecto de observar dichas variaciones:

Imagen LandSat (marzo 1997), Imagen Ikonos (octubre 2001) e Imagen Quick Bird (enero 2006).

Se realizó un ajuste de las imágenes LandSat y QuickBird hacia la imagen Ikonos, previamente georeferenciada a POSGAR'98, sistema oficial de la provincia de Mendoza en ese momento. Se utilizaron clasificaciones no supervisadas, para las imágenes Ikonos y Quick Bird, detectando el curso del agua, con el objeto de contar además con la posibilidad de realizar otras mediciones que el trabajo requiriera.

Finalmente se trazaron ambas líneas de ribera, derecha e izquierda, mediante la observación visual de la morfología fluvial que se destacaba fundamentalmente por los cambios de color entre los brazos activos, el cauce principal y la vegetación de las márgenes, por un lado, y por la existencia de grandes barrancas o bardas.

Esta delimitación fue validada en campo, en todos los sitios en los que se presentaron dudas en el trabajo de gabinete.

8.10 BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Noticias Tierra Viva. (1 de febrero de 2021). *La línea de ribera: un límite para la protección de los humedales*. Recuperado de https://agenciatierraviva.com.ar/la-linea-de-ribera-un-limite-para-la-proteccion-de-los-humedales/

Allende, G. (1971). Derecho de aguas con acotaciones hidrológicas, Buenos Aires: EUDEBA

Arenas, Tomás (2025), "Software para ajuste de funciones de probabilidad". Departamento de Hidrología del Departamento General de Irrigación.

Belaga, J, y Vicioso, B. (1991), "La determinación efectiva de la línea de ribera en los cursos de agua no navegables". En: *VIII Congreso Nacional de Cartografía*, Paraná: I.G.M., pp. 227-232

Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual* (Version 6.4) [Software]. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

Cano, G. (1988). *Estudio sobre línea de ribera. Informe final*, vol. I y II, Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones

Castello, M. (1921). *Legislación de Aguas*, Buenos Aires: UBA

Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.

Colegio de Agrimensores – La Voz del Interior. (28 de diciembre de 2024). *Cómo se determina una línea de ribera*. La Voz. Recuperado de https://www.lavoz.com.ar/espacio-institucional/como-se-determina-una-linea-de-ribera/

Consejo Hídrico Federal (COHIFE). (s.f.). Comisión de Línea de Ribera y Ordenamiento Territorial. Recuperado el 25 de enero de 2026, de https://www.cohife.org.ar/ribera/

Corte Suprema de Justiciad de la Nación -CSJN- (1959), *in re Fresone Micheli Ltda. S.A. c/ Nación*, Fallos: 245:470

Corte Suprema de Justiciad de la Nación -CSJN- (2009), *in re Las Mañanitas SA c/Provincia de Neuquén*, Fallos 332:1704

Deferrari, S. (2025), "Dominio Público". En: Milanta, C.A.M. (dir.) y Richero, M.J. (coord.), *Derecho Administrativo. Conceptos esenciales y perspectiva constitucional*, La Plata: Librería Editora Platense

Departamento General de Irrigación. (2015). Resolución 400/15: Protocolo para la determinación de Línea de Ribera en la Provincia de Mendoza. Mendoza, Argentina.

Espínola, A.A. (2010), "La línea de ribera. Análisis reflexivo desde la óptica técnico legal". En: *Revista El Agrimensor Chubutense*, Colegio Profesional de Ingeniería, Arquitectura y Agrimensura de la Provincia de Chubut, año 12, n° 18, pp. 3-16

Gobierno de la Provincia de Mendoza, Departamento General de Irrigación. (2004). Dictamen legal: "Líneas de ribera en ríos y embalses; definiciones; ríos regulados y no regulados; aplicabilidad del concepto".

Gobierno de la Provincia de Mendoza, Departamento General de Irrigación. (2005). Resolución 17/06 de Superintendencia.

Garrido, R. y Andorno, L. (1972). *Código Civil anotado*, T° I y II, Buenos Aires: Víctor P. de Zavalia

Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Marcos de Referencia Geodésicos: POSGAR 07 y Modelo de Geoide GEOIDE-Ar16*. Ministerio de Defensa. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar

Llambías, J.J. y Alterini, J. (1981). *Código Civil anotado*, T° IV-A, Buenos Aires: Abeledo Perrot

López, J. (1975), "Cursos de Agua". En: *Curso de Derecho de Aguas*, vol. I, Mendoza: INCyTH

López, J. (1983). *Determinación de la Línea de Ribera*, Mendoza: INCYTH-CELA, 1983

López, J. (1987). *El Derecho de Aguas en la legislación federal argentina*, Córdoba: Academia Nacional de Derecho y Ciencias Sociales de Córdoba

Marienhoff, M. (1970), "Acerca de la reforma del Código Civil en materia de aguas". En: *Revista Jurisprudencia Argentina*, T°1970, Secc. Doctrina, pp. 674-685

Marienhoff, M. (1971), Régimen y Legislación de las Aguas Públicas y Privadas, Buenos Aires: Abeledo Perrot

Pinto, M. (2004), "Limitaciones al dominio vinculadas al uso de aguas". En: Revista La Ley Gean Cuyo, T° 2004, pp. 742-751

Pinto, M. (dir), Andino, M. Rogero, G. (2019). *Ley de Aguas de 1884. Comentada y Concordada*, T° I, Mendoza: Irrigación Edita

Pinto, M. y Martín, L. (2015), "El régimen de las aguas en el nuevo Código Civil y Comercial y su compatibilidad para la tutela ambiental". En: *Revista de Derecho Ambiental*, n°43, pp. 109-127

Provincia de Entre Ríos. (1996). *Ley N° 9008 de definición de riberas de ríos*. Boletín Oficial 18–7–1996. Recuperado de https://faolex.fao.org/docs/pdf/arg77002.pdf

Spota, A. (1941). *Tratado de Derecho de Aguas*, T° II, Buenos Aires: Menéndez

Superior Tribunal de Justicia de Río Negro -STJRN- (2015), in re Arrondo Costanzo Agustin y otras c/ Caverzan Eduardo David y otros s/ reivindicación, sentencia del 06/10/15

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (1989a), *in re Emilio Cugnini SA c/ Departamento General de Irrigación y otros*, L.S. 209-170

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (1989b), in re Poder Ejecutivo de la Provincia en j: 120575 Torres Francisco c/Prov de Mendoza p/Inconst. Cas, L.S. 208-161

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2024), in re Molinos Río de la Plata SA c/ Municipalidad de Guaymallén p/APA, L.S. 699-006

U.S. Army Corps of Engineers. (2002). User's manual HEC-RAS (Version 3.1)

Volonté, M. (2014), "A propósito de la línea de ribera y el efecto declarativo de su determinación". En: *elDial.com Express. Newsletter Jurídico*, año 16, n° 3.931, www.eldial.com, cita digital: elDial DC1C39

Villodas, R. (2020), "Guía de estudio de Hidrología e Hidrología Aplicada". Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

Zavala, G. (2024), "La línea de ribera fluvial y la propiedad privada". En: Revista La Ley, T° 2024-A, pp. 140-165

9 EL AFORO DE LOS DERECHOS DE AGUA: PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE VOLÚMENES

Dr. Mauricio Pinto[16] / Ing. Esp. Rubén Villodas[17]
Dra. M. Marcela Andino[18]

9.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL AFORO

Sin lugar a dudas, la gestión integrada de los recursos hídricos es un campo de encuentro disciplinar, donde necesariamente todas las perspectivas técnicas deberían interactuar en el desarrollo de la gobernanza del agua.

Pero esto no siempre ocurre. Cada disciplina presenta un modelo de problemas y soluciones que encauza su metodología de trabajo (Kuhn, 2002), y eso muchas veces lleva a una dificultad en el trabajo mancomunado. Como explica Follari (2001), generalmente los lenguajes de las ciencias son mutuamente intraducibles y fuertemente diferenciales, y la unión interdisciplinar no tiene nada de "natural", es siempre precaria y problemática.

16 Abogado, Doctor en Derecho. Máster en Derecho Ambiental. Diplomado en Estudios Avanzados en Propiedades Públicas y Medio Ambiente. Profesor de Derecho Ambiental e Investigador en las Universidades del Aconcagua y Nacional de Cuyo.

17 Ingeniero civil, Especialista en Ingeniería Ambiental, Director de Gestión Hídrica del Departamento General de Irrigación y Profesor Titular de Hidrología e Hidrología Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

18 Abogada, Doctor en Derecho por la Universidad de Zaragoza, España. Docente de grado y Posgrado. Directora del IEDS de la FCJS de la Universidad de Mendoza Investigadora de las Universidades de Mendoza y del Aconcagua. Consultora. Asesora del Superintendente General de Irrigación.

Con la sagacidad que lo caracteriza, Guillermo Cano (1987) ha explicado que a menudo se avanza en una labor multidisciplinar, en la que técnicos de diversos saberes convergen en un tema común, "pero se miran de reojo y no dialogan entre sí", lo que genera pocos resultados si es que se obtienen. Por eso, entiende que el trabajo multidisciplinar es solo el primer paso, y debe ser seguido por la inter y transdisciplinariedad.

Mientras que lo multidisciplinar implica la participación de más de dos disciplinas sin que cada una pierda su metodología propia, la interdisciplinariedad implica superar la mera yuxtaposición de saberes para avanzar hacia la complejidad de su integración metodológica. La transdiciplinariedad es un grado de integración mayor en el que se supera los límites de la propia disciplina para avanzar en los vínculos que existen de una disciplina con otras (Paoli Bolio, 2019).

En la gestión hídrica, ningún abordaje resulta eficiente si no asume el esfuerzo de ir más allá de la mera visión disciplinar o -incluso- multidisciplinar de los enfoques intervinientes, sean estos hidrológicos, económicos, jurídicos u otros. Resulta esencial un trabajo inter y transdisciplinar.

El tema del presente trabajo es un claro ejemplo de ello. La gobernanza hídrica incluye la forma en que se implementan las políticas de asignación y regulación del agua (Mishra, 2023); y aunque esas políticas indudablemente parten del análisis técnico, terminan implementadas en procedimientos vinculados a la asignación de derechos de uso del agua.

Los derechos de aprovechamiento de aguas generan la expectativa de recibir un volumen, el cual en las legislaciones siempre ha sido limitado a alguna cantidad (Vergara Blanco, 1998, p. 368). Esos derechos, como toda prerrogativa jurídica, presentan un contenido que define su alcance: qué uso del agua se permite, de qué fuente de suministro, con qué volumen, en qué momento, etc. La entidad del derecho al uso del agua de cada usuario es la conjunción necesaria entre lo técnico y lo jurídico, entre el contenido sustancial de lo que debe -y puede- usarse y la instrumentación legal de ese contenido; y el análisis del tema sólo desde una de esas visiones necesariamente estará tuerto.

Tomando una perspectiva interdisciplinaria del tema, lo primero que surge es una aclaración en relación a los discursos disciplinares. En la legislación que se analizará en los acápites siguientes el término "aforo" presenta un significado disímil al propio que se le asigna en otras ciencias, lo que muchas veces genera confusiones en los trabajos multidisciplinares. Incluso entre las legislaciones de diversas épocas no siempre hay una utilización unívoca del término, ya que los textos normativos suelen estar influenciados por la base disciplinar de quienes han redactado los proyectos.

El carácter equívoco del término aforo hace que sus acepciones no sean coincidentes, no solo entre la ciencias hidrológicas y jurídicas, sino con otras disciplinas e incluso con el sentido cotidiano del término. Según la Real Academia Española (RAE, s.f.), el aforo es la "acción y efecto de aforar", el "número máximo autorizado de personas que puede admitir un recinto destinado a espectáculos u otros actos públicos", o la "capacidad de un barril u otro recipiente".

Desde el enfoque financiero y tributario se suele referir al aforo como el pago de una contribución genérica (Villegas, 2001, p. 240), una tasa por servicios municipales *uti singuli* (SCJM, 2019; Ordenanza 10226/77 de la Ciudad de Mendoza), o incluso un canon que se abona a la administración pública por la explotación de determinado bien (STJTdelF, 2006); y en los negocios civiles, al porcentaje deducido del valor nominal de cada crédito para cubrir el riesgo de incobrabilidad (art. 1426 CCyC; Carmelo, 2015, p. 140).

Aunque podrían brindarse muchos otros ejemplos de esta disquisición terminológica, basta como ejemplo para el tema tratado, interesando en cambio puntualizar que, desde la hidrología y la hidráulica, aforar implica "determinar, a través de mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento dado" (Villón Béjar, 2022, p. 292); "es el procedimiento por el cual se mide el caudal que pasa por un determinado lugar" (Carrión, 2015).

Pero la significancia jurídica va más allá que el concepto que postulan las ciencias hídricas. No se trata solamente de determinar el caudal en un periodo de tiempo y en una sección de un cauce, aunque ello también se vincule y entrelace con las previsiones normativas sobre aforo. Como explica Vergara Blanco (1998, p. 369), el aforo desde su concepción jurídica tiene por objeto determinar el volumen de agua que aprovechará cada titular de un derecho de uso, siendo en consecuencia "la medida del derecho".

Es, entonces, un procedimiento jurídico en el que se establece el volumen que se encuentra asignado para satisfacer las dotaciones correspondientes a los derechos otorgados; y a partir de allí y en función de la disponibilidad, poder determinar no solo la distribución del agua entre los usuarios existentes, sino también si se pueden otorgar nuevos derechos en función de la disponibilidad hídrica. Para esto, no solo se debe determinar el agua existente y disponible para su uso (aforo en sentido "hidrológico"), sino en especial el volumen asignado a los derechos de aprovechamiento (aforo en sentido "jurídico"); ya que sin esta última operación en realidad la demanda se mantiene indeterminada y sujeta a una variable discrecionalidad de criterio, lo que no es compatible con la seguridad jurídica que corresponde a la esencia y naturaleza de un derecho.

Muchas veces, desde un reduccionismo disciplinar, se equipara y confunde el procedimiento de aforo con la realización de un balance hídrico. Y aunque existe una relación notoria entre ambos, ya que los aforos hidrológicos y jurídicos son la base de todo balance, el balance no coincide completamente con el aforo. Un balance hídrico es un estudio técnico en el que se establece la diferencia entre todos los recursos hídricos que ingresan y egresan de un sistema en un intervalo de tiempo, permitiendo evaluar cuantitativamente los recursos hídricos y sus modificaciones por la acción antrópica (Sokolov y Chapman, 1981, p. 12). Mientras que el procedimiento legal de aforo tiene por objeto establecer el contenido de los derechos existentes para abastecerlos y para preservarlos ante usos futuros cuando la disponibilidad hídrica es insuficiente.

La diferencia es clara en la hipótesis de una cuenca deficitaria por sobrempadronamiento y/o usos irregulares. En este caso, el balance hídrico reflejaría los ingresos (la oferta hídrica) y los egresos (pérdidas por infiltración y evaporación, extracciones que de hecho

se producen de manera efectiva -sean legítimas como ilegítimas-, etc.), y por eso es fundamental a la hora de atender nuevas posibilidades de uso (Pinto y Buccheri, 2017). Mas no hace al contenido y alcance de los derechos que deberían ser satisfechos, donde la antigüedad y categoría de los mismos incide en su eficacia y -consiguientemente- en el volumen que les corresponde legalmente.

Un estudio de balance es un insumo técnico que brinda información fáctica sobre el funcionamiento del sistema hídrico, sobre su realidad, reflejando el agua y su distribución real, lo cual eventualmente podría ser disfuncional con respecto al régimen de derechos. Esto es muy importante comprenderlo, ya que, si la gestión de los derechos de aprovechamiento es irregular o presenta falencias, esa realidad -incluso cuando se refleja en un estudio de balance- no altera el contenido de los mismos; por el contrario, el balance podrá señalar aspectos anómalos que deben ser ajustados a derecho. Son los derechos definidos en el procedimiento de aforo los que deben determinar la demanda para concretar el balance y regir la distribución, no pudiendo la distribución que se realiza en una época concreta variar por sí misma el contenido de los derechos.

Esto último es importante, ya que mientras no se ha concretado el procedimiento de aforo los estudios de balances trabajan con supuestos, y si bien pueden estimar una demanda genérica en función de las hectáreas bajo regadío, sean solo las implantadas o el total de empadronadas, esa estimación es necesariamente hipotética, ya que -en definitiva- no se ha concretado la asignación de volumen a cada derecho, lo que excede el mero análisis técnico (hidrológico, agronómico, etc.) para incluir además valoraciones jurídicas sobre las características, categorías, alcance y antigüedad de los derechos.

Además, no debe perderse de vista que cuando se trata del aforo en sentido jurídico, el tema refiere a una decisión pública que -al definirlo- incide en el contenido de cada concesión y permiso de uso de agua; es decir, aunque el aforo legal tenga una base técnica, no se trata de un mero estudio técnico, sino de producir efectos sobre el contenido de prerrogativas jurídicamente tutelables, lo que evidentemente exige salvaguardar el debido proceso y materializarse mediante una expresión jurídica adecuada.

Por ello, a diferencia de un estudio de balance -que puede referir genéricamente al conjunto de usos existentes- el procedimiento de aforo requiere precisión en cuanto a qué derechos concretos refiere, con detalle de titularidad y demás elementos de tales títulos, así como la asignación de agua que se realiza a los mismos, brindando la "medida de los derechos". Esto conlleva una complejidad formal y sustancial en la tramitación que excede el mero análisis técnico.

Moisset de Espanés (2003, p. 382), al analizar la registración de los derechos de agua, explica la importancia de un adecuado aforo hidrológico y balance hídrico, ya que "se trata de problemas técnicos -ajenos a nuestra especialización jurídica- pero no pueden perderse de vista, porque sin esos datos se carece de los elementos indispensables para la *determinación* del objeto del derecho, y se corre el riesgo de conceder *derechos de papel*, es decir, titularidades que no podrán hacerse efectivas porque recaen sobre aguas inexistentes".

Por ello, sin dudas un estudio de balance hídrico contiene elementos útiles para el procedimiento de aforo, especialmente en relación a su efecto con respecto a la posibilidad de otorgar usos futuros y abastecer los que han sido otorgados como eventuales. Pero, además, también para otros muy variados aspectos de la gestión hídrica cotidiana, como la priorización estratégica de obras, el manejo de embalses, la realización de predicciones sobre reservas, la distribución de agua en situaciones deficitarias -sean estructurales u ocasionales-, la identificación y cuantificación de usos irregulares, la identificación de variaciones hidro-climáticas, e incluso brindar insumos para el ordenamiento territorial, entre muchos otros necesarios para la planificación y gestión hídrica.

El procedimiento de aforo evidentemente tiene una fuerte componente de discrecionalidad técnica tanto en la concreción del aforo -en sentido hidrológico- que permite establecer la oferta, así como la determinación de los caudales disponibles y la dotación necesaria para abastecer los derechos existentes. Cada una de esas etapas tiene sus particularidades y contextos procedimentales que hacen no solo a criterios técnicos y jurídicos, sino también a condicionamientos legales y formalidades necesarias para que el *iter* irradie efectos hacia los titulares de los derechos e incluso hacia terceros.

En los puntos siguientes se analizarán los aspectos normativos que hacen a cada una de las etapas del procedimiento de aforo, y sus particularidades tanto en la determinación de la demanda que implican las dotaciones que corresponden a los derechos otorgados como en la fijación de la oferta. Para ello, se iniciará con un análisis del régimen de otorgamiento de usos de agua, y desde allí se avanzará en los aspectos jurídicos que hacen al tema que nos ocupa.

9.2 LOS USOS ESPECIALES COMO MECANISMO DE ASIGNACIÓN DEL AGUA

Estando directamente vinculado el procedimiento de aforo a la definición del contenido -y también a la eventual asignación- de derechos de uso del agua, para comprender el fundamento y la dinámica del mismo es necesario atender conceptualmente el sistema jurídico propio de tales derechos.

El agua -salvo excepciones muy limitadas- es un bien del dominio público perteneciente al Estado. Consecuentemente, como todo bien demanial se encuentra destinado al uso público, es decir de toda la población (Marienhoff, 1960, p. 141).

El uso del agua por la comunidad en general es encauzado jurídicamente a través del llamado "uso común", entendido como aquel que "pueden realizar todos los hombres por su sola condición de tales" (Marienhoff, 1939, p. 544), lo que incluye todo uso individual que importe satisfacer necesidades básicas, sin modificación sensible de la calidad o cantidad del recurso hídrico (Pinto, Andino y Rogero 2019).

En principio, los usos comunes resultan libres, impersonales, e ilimitados (Dromi, 1994, p. 433). Sin embargo, su ejercicio no debe implicar una disminución sensible de los caudales ni perjuicio en la calidad del agua, lo que hace que en los mismos los usuarios no rivalicen ni se excluyan entre sí (Martín Retortillo, 1997, ps. 236, 241 y 247). Bajo estos conceptos, las regulaciones autorizan -mediante una habilitación legal general- que todos usen el agua en cualquier momento (Embid Irujo, 2007, p. 950); pero a la vez -como contrapartida y para asegurar que los consumos sean realmente limitados- prohíben los medios mecánicos de extracción, exigiendo que el caudal se tome "a mano" y sin deteriorar las márgenes ni desviar caudales (Pinto y Martín, 2015).

Cuando se requiere un volumen mayor al que se extrae de tal manera, y que consecuentemente pueda alterar sensiblemente la disponibilidad, las regulaciones exigen que el interesado solicite y obtenga una concesión o un permiso que habilite el "uso especial" o "privativo" del agua, evitándose así que exista una extracción desorganizada, que pueda resultar superior a la oferta hídrica de cada cauce.

El concepto que se encuentra atrás de este esquema no es otro que el de la "tragedia de los recursos comunes" expuesta por Hardin (1968); es decir, la necesidad restringir el acceso a un bien común mediante un sistema de asignación establecido en función de la capacidad de carga del mismo (Pinto, Gennari y Riera, 2023), ya que lo contrario llevaría a que las extracciones ilimitadas generen una sobreexplotación que agote el curso en perjuicio de todos los usuarios.

Como explica Celume Byrne (2013, p. 51), cuando un recurso que económicamente es un bien común que se encuentra jurídicamente publificado, una forma de evitar la tragedia de los recursos comunes será la creación de derechos -como medios de exclusión- que determinen una unidad de medida para su extracción privativa por aquellos a los que se asigne la titularidad. De este modo, el uso libre que en principio caracteriza al dominio público es limitado bajo la justificación y exigencia de la buena gestión del recurso (Pimiento Echeverri, 2010, p. 188).

La idea de acudir a los usos especiales como técnica para evitar la sobreexplotación es patente desde el inicio mismo del derecho de aguas moderno. La Ley española de 1866, primera norma que en materia de aguas reguló el régimen concesional moderno, en su Exposición de Motivos -reproducida por Martín Retortillo (1963, p. 767)- señalaba la necesidad de "la intervención del Poder público en el disfrute y aprovechamiento de aquellas cosas que, aunque son de uso común, no bastan para el consumo de todos. La sociedad no puede abandonarlas al interés o a la codicia individual sin ocasionar grandes perturbaciones en el orden público, y el fomento de la riqueza exige, por otra parte, que se dé la preferencia a aquellos aprovechamientos que más puedan contribuir a ella, distribuyendo esos bienes comunes con la misma economía y acierto con que prudentemente un padre de familia distribuye los suyos".

De este modo, el marco conceptual del sistema concesional conlleva que los usos del agua solo debieran otorgarse mediante usos especiales cuando existe disponibilidad para

habilitarlos sin producir perjuicios a los otorgados con anterioridad. Es lo que se conoce como la cláusula "sin perjuicio de terceros", la que es un principio esencial de política hídrica clásicamente reconocido (Pigretti, 1965, p. 59).

Dentro de los medios para habilitar usos especiales, los permisos y las concesiones difieren en su estabilidad[19]. Pero ambos resultan títulos jurídicos que tienen por objeto otorgar la extracción y uso de agua y consiguientemente invisten al beneficiario de una situación jurídica amparada legalmente que no puede ser desconocida, sea porque su titular ostenta un derecho subjetivo -caso del concesionario- o un interés legítimo -caso del permisionario[20]-.

La base de la regulación está dada, entonces, por el otorgamiento de prerrogativas a extraer volúmenes de agua que -amén de satisfacer la necesidad a la que se destina- nunca deben sobrepasar la capacidad de carga que presenta el cuerpo de agua que los abastece, ya que lo contrario afectaría paulatinamente a todos los usuarios.

Es obvio que para que tales premisas sean operativas no basta con conocer la oferta y disponibilidad del agua, sino en especial debe establecerse la demanda que conCuadro el derecho de los usuarios a usar un volumen determinado de agua. Ese volumen conCuadro el objeto del derecho de uso otorgado, y por tanto debe ser cierto, preciso, determinado y posible (Dromi, 1994), no debiendo ser afectado por usos posteriores. Y si bien es cierto que antes del aforo el contenido de los derechos puede presentar imprecisión e indeterminación si el volumen no se especifica en el título de otorgamiento, también es cierto que resultan determinables con precisión a través del procedimiento previsto para definirlos. El aforo dará un contenido preciso y definido a los derechos, generando una situación de estabilidad y certeza que es definitoria de la seguridad jurídica que debe procurar todo régimen legal (Kemelmajer de Carlucci, 1993; Mustapich, 1968).

---

19 La concesión genera un derecho subjetivo que integra el patrimonio de su titular, y por ello su revocación por motivos de oportunidad o conveniencia implica un trámite expropiatorio con la consiguiente indemnización, tal cual regula el art. 117 de la Ley de Aguas de Mendoza. El permiso, en cambio, es precario, y puede ser revocado sin indemnización; pero es necesario aclarar que la potestad revocatoria no es libre, sino que presenta límites: la Suprema Corte de Justicia de Mendoza (2011a, 2011b, 2012a, 2012b), luego de sostener que los permisos resultan "una concesión de alcance restringido, por cuanto otorga derechos de menor intensidad y mayor precariedad, [...] un acto que autoriza a una persona el ejercicio de un derecho precario, en principio prohibido por el orden jurídico", ha observado que "el acto que dispone la revocación de un permiso de uso del dominio público, debe ser motivado, estableciendo las causas por las que se toma esa decisión, lo que permitirá determinar si es arbitrario e ilegítimo", especificando que "así como el otorgamiento del permiso requiere una evaluación de correlación entre el interés público y la finalidad para la cual es permitido el uso especial sobre una porción del dominio público, su revocación también exige que haya desaparecido o variado objetivamente la conveniencia que dio lugar al nacimiento del permiso en función de los mismos intereses generales o fin público que inicialmente lo justificaron".

20 En todo caso, siendo los permisos una concesión de alcance restringido, por cuanto otorga derechos de menor intensidad y mayor precariedad -según ha definido la misma Corte en las causas citadas *supra*-, en la medida que los mismos se encuentren vigentes deben considerarse como los usos eventuales de menor antigüedad.

9.3 PROCEDIMIENTO DE AFORO EN LA PROVINCIA DE MENDOZA

Los conceptos generales expuestos en el apartado anterior han sido plenamente asumidos por las regulaciones de la provincia de Mendoza. La Ley de Aguas de 1884 -en adelante LA- dispuso explícitamente que -fuera de los casos de los usos comunes- todo aprovechamiento debía contar con expresa concesión de autoridad competente (art. 110 LA), debiéndose respetar el derecho que los titulares adquirieren para aprovechar el agua en la proporción y condiciones en que se otorgara (art. 12 y 13 LA).

Para definir la proporción referida, la ley dispuso que debe establecerse mediante el procedimiento aforo la cantidad de agua concedida en cada caso (art. 122 LA y art. 10 Ley 430); prohibiéndose reiterativamente que las nuevas concesiones pudieran perjudicar a los derechos preexistente (arts. 18, 19, 22, 23, 105 y 118 LA). A tal fin, la ley ordenó a la autoridad del agua que determinara la disponibilidad hídrica (arts. 191 y 196 LA y art. Ley 6105) y estipuló que solo podían otorgarse nuevas concesiones en el caso de que existieren sobrantes de caudal después de cubiertos completamente los aprovechamientos existentes (art. 128 LA).

Ese es el basamento del régimen legal del aforo, pudiendo extraerse de esas normas los aspectos y etapas fundamentales del procedimiento correspondiente al mismo. Por una parte, la determinación de la demanda de volumen que se requiere para satisfacer las dotaciones que corresponden a los usos otorgados; y por otra, la oferta y disponibilidad de agua que permite satisfacer usos actuales y determinar si existen sobrantes para usos futuros.

Ambos momentos son dos caras de una misma moneda, y en torno a ellas gira el sistema de asignación de derechos de aprovechamiento del agua. En principio, solo cuando lo permite la relación entre ambos componentes -disponibilidad y demanda-, es posible otorgar nuevos derechos de uso.

9.3.1 La determinación del volumen que corresponde a los usos otorgados

9.3.1.1 El volumen como base del sistema jurídico de uso del agua

Para la determinación de la demanda que se requiere para satisfacer las dotaciones correspondientes a los derechos existentes es necesario que a través del procedimiento de aforo se defina el contenido volumétrico propio del objeto de tales derechos (Pinto, 1999). Ahora, ¿Cuáles son los parámetros legales de la fijación de ese volumen?

Lo primero que hay que observar es que hasta el momento las condiciones legales y técnicas del aforo exigido legal y constitucionalmente no se encuentran reguladas

ni reglamentadas con precisión, más allá de aspectos genéricos que estipula el régimen ya referido, circunstancia que subsiste a pesar de que ha sido criticada por la doctrina desde hace décadas (Cano, 1967; Pinto, 1999). Esta situación, mientras no se dicte un régimen legal más preciso, deja abierta la puerta a su reglamentación dentro de la discrecionalidad técnica administrativa.

Dentro de los aspectos genéricos referidos, la Ley de Aguas de 1884 estableció que en toda concesión de aprovechamiento de aguas públicas se debe determinar la cantidad que corresponda como máximum, siendo ésta de hasta uno y medio litros por segundo y por hectárea (47 000 m³/ha/año) cuando sea un derecho para riego (art. 122 LA).

De esta forma, el texto legal determinó "el máximum en que debe encuadrarse toda concesión de aguas, dejando a resoluciones posteriores, fundadas en el estudio y la experiencia, la misión de fijar definitivamente, en el porvenir, la cantidad necesaria; y no podía ser de otro modo, si se tiene en cuenta que cuando se sancionó la ley de 1884, las labores agrícolas entre nosotros eran incipientes o propiamente no existían, [...] no se habían hecho, tampoco, los estudios sobre el terreno, régimen de los ríos, clase de tierras, cultivos, canalizaciones, etc., elementos de juicio sin los cuales toda disposición tenía que ser necesariamente transitoria por lo incierta; y huyendo, pues, de caer en el empirismo, ya que únicamente los estudios técnicos podían ilustrar el criterio de los legisladores, se decidieron sin duda, prudentemente, a fijar un máximum que, aunque excediendo a toda necesidad, en ningún caso pudiera sobrepasarse y suspendía la determinación de la cuota de agua suficiente para época oportuna, es decir, una vez conocidos o en situación de conocer los antecedentes referidos, que debían servir de base ineludible a aquella" (Civit, 1920a).

Posteriormente, la Ley 430, sancionada en 1907, determinó con precisión el objeto del procedimiento de aforo en relación a la definición del volumen de los usos concedidos, estipulando en su art. 10 que "mientras no se verifique el aforo de los ríos y arroyos y se determine la cantidad de agua que corresponde por cada hectárea, según la naturaleza del terreno y clase de cultivos existentes", los usos existentes como eventuales mantendrían tal carácter.

La finalidad de esta norma, según expresa su propia fundamentación, se encaminaba a "poder llegar, por el aforo de los ríos y por el estudio de las tierras y clase de cultivos, a que el agua se distribuya en forma metódica, satisfaciendo los servicios a que se la destina y dando a cada uno lo que legítimamente necesite y le corresponda"(Civit, 1920b); por ello, "previo a toda concesión debe apreciarse el caudal medio destinado para regadío por el río o arroyo de que derive, así como la estimación de la cantidad de agua normal que requiere un terreno y un cultivo determinado para no incurrir en el error, por falta de antecedentes, de otorgar aprovechamientos de agua en cantidad mayor o menor a la necesaria por hectárea, desde que varía según la naturaleza del terreno y clase de cultivo" (Civit, 1920b).

Todo esto, para corregir el hecho de que "la distribución del agua desde la primera ley que se dictó al respecto, no obedece a un criterio ni a base alguna científica y ha sido determinada teniendo en cuenta su propia abundancia y la limitada extensión de los cultivos [...]. Pero hoy, que se comprende lo que significa su aprovechamiento para el desarrollo de la agricultura y el valor que representa como factor de riqueza, de prosperidad económica y de engrandecimiento industrial, y que la actividad y las energías de todos se encaminan presurosas a servirse de la irrigación del suelo para ensanchar los cultivos existentes, se inicia en la conciencia pública una tendencia completamente contraria y más acorde con los intereses y economías generales" (Civit, 1920b).

Cabe aclarar que existe un sesgo -tanto en la normativa como en las fundamentaciones- hacia los usos agrícolas, lo que se explica por ser mayoritarios en los derechos otorgados y volúmenes comprometidos en ellos. Pero eso no debe llevar al equívoco sobre el alcance de lo reglado, ya que la letra expresa del art. 122 LA -aunque particulariza en la agricultura- se refiere a "toda nueva concesión de aprovechamiento de aguas públicas".

9.3.1.2 La falta de implementación del procedimiento de aforo y sus consecuencias

A pesar de la previsión normativa que -desde 1884, e incluso antes- ordena determinar el contenido volumétrico de los derechos, nunca ha existido un pronunciamiento declarando consumado el aforo y fijando la cantidad de agua que corresponde a cada derecho de aprovechamiento para satisfacer las necesidades a que se destina, sea para uso agrícola u otro (Pinto, Andino y Rogero, 2019, p. 138). Incluso, en tiempos recientes se han dictado normas que han impulsado la concreción del aforo, como ocurre con las Leyes 6105 y 7444.

En cambio, desde el punto de vista hidrológico, el Departamento General de Irrigación realiza la medición de caudales en forma constante los principales ríos provinciales según le encomienda el art. 191 LA, e incluso ha realizado y actualizado diversos balances hídricos aprobados por resolución. Pero la tramitación y contenidos de estos últimos, no alcanza los estándares que implica un procedimiento con incidencia en el contenido de los títulos jurídicos de los concesionarios y permisionarios, que conllevan la necesidad de concretizar con claridad la situación de cada derecho e implementar medidas que hagan al debido proceso; a lo que se suma la inconsistencia de excluir indebidamente del cómputo parte de los derechos vigentes que integran la demanda hídrica (Pinto y Buccheri, 2017).

La consecuencia más evidente de la falta de realización del aforo es que hasta el momento subsiste tanto una distribución de agua que distingue derechos definitivos y eventuales, así como una gestión que prorratea el agua disponible en función de las hectáreas empadronadas y no de un volumen técnicamente asignado. Ambos aspectos serán analizados *infra* con mayor detalle.

9.3.1.2.1 Derechos de usos eventuales y definitivos como categorías jurídicas

En la mayoría de las provincias argentinas la legislación distingue los usos especiales otorgados como definitivos -también llamados indefinidos, permanentes o efectivos-, de aquellos que se otorgan en forma eventual[21]. La diferencia entre ambas categorías es, en principio, que las concesiones otorgadas dentro del primer caso tienen derecho a ser abastecidas con prioridad o preferencia a las otras, de modo que las concesiones eventuales implican un derecho para un uso circunstancial, que puede ejercerse cuando, cubiertos los derechos permanentes, existieren excedentes de agua.

El caso mendocino -el primero en implementar esta técnica regulatoria[22], y consiguientemente fuente de los restantes- requiere algunas precisiones. Antes del dictado de Ley de Aguas de 1884 la categoría eventual no era parte del régimen mendocino; incluso se había prohibido de manera expresa el otorgamiento de nuevos usos -concesiones y permisos- en los ríos Mendoza y Tunuyán hasta que se sancionara una nueva ley de aguas y se aforara los ríos (Cano, 1941, ps. 43 y ss.).

Al dictarse la Ley de 1884 se dispuso que los propietarios de terrenos cultivados debían presentarse a registrar los usos existentes y solicitar el título correspondiente por el número de hectáreas que justifiquen tener (art. 103 LA), surgiendo así las concesiones "definitivas" o "indefinidas", las que tienen derecho a ser servidas en todo tiempo sin consideración a la antigüedad de su otorgamiento (Cano, 1967, p. 27).

Y si bien se estipuló como regla que solo podían otorgarse nuevas concesiones en el caso de que existieren sobrantes de caudal después de cubiertos completamente los aprovechamientos existentes (art. 128 LA), como excepción la Ley también dispuso un cambio verdaderamente copernicano al habilitar el otorgamiento de nuevos derechos sin que realmente se verifique la existencia de caudal: "cuando del aforo resulte no haber sobrante de aguas en años ordinarios, solo podrá concederse el derecho de aprovechamiento eventual" (art. 129 LA), el que sólo existe "con las intermitencias debidas a la carencia o la disminución del agua" (art. 20 LA), y "no pueden nunca perjudicar a los que tienen o tengan derecho de aprovechamiento definitivo" (art. 22 LA), por lo que la supresión de tales usos no podía considerarse un daño (art. 56 LA).

21 Además de las regulaciones mendocinas, puede verse estas categorías en los Códigos y Leyes de Aguas de Jujuy (Leyes 161), Salta (Ley 1071), Catamarca (Ley 2577), La Rioja (ley 4295), Neuquén (Ley 899), Tierra del Fuego (Ley 1126), Tucumán (Ley 7139), Santiago del Estero (Ley 4869), Formosa (Ley 1246), Córdoba (Ley 5589), Corrientes (Decreto-Ley 191/01), Misiones (Ley XVI - n° 15) y La Pampa (Ley 2581).

22 El régimen de usos definitivos/eventuales de aguas públicas regulado en la ley mendocina es novedoso e innovador con respecto a su fuente, la Ley de Aguas española de 1866/1879. Esta última, estipulaba el Cuadro del uso eventual con respecto a la relación que podía darse en el uso de aguas privadas, entre el propietario del fundo donde nacía -a quien se asignaba el dominio del agua- y los propietarios de predios inferiores por los que corría.

Incluso, y acorde a la cláusula sin perjuicio de terceros, la relación de prelación entre definitivos y eventuales se reitera dentro del universo de estos últimos en forma tal que los más recientes tampoco pueden perjudicar a los más antiguos, de modo que todos ellos "serán considerados en el orden de su antigüedad" (art. 21 LA).

Este régimen implicó el surgimiento de numerosos usuarios que reclamaban el uso del agua independientemente de que la disponibilidad fuera o no realmente suficiente, generándose tensiones en la distribución del agua que crecían a medida que se otorgaban nuevos derechos.

La Constitución provincial de 1916 consolidó este sistema intertanto no se realice el aforo, al estipular en el art. 194 que en tal situación de incertidumbre las concesiones que se acuerden tendrán forzosamente el carácter eventual y requerirán -previo informe del Departamento General de Irrigación- del voto de las dos terceras partes de los miembros de cada Cámara legislativa; y una vez efectuado el aforo, las concesiones de agua sólo necesitarán el voto de la mitad más uno de los miembros de cada Cámara. Igualmente, en el art. 195 se determinó que a partir de la realización del aforo o de obras que permitan un mayor aprovechamiento del agua el Departamento General de Irrigación debe informar a la Legislatura para que con la mayoría de la mitad más uno de cada Cámara decida si se autoriza o no la extensión de cultivos en nuevas zonas.

Es claro en la inteligencia de la letra constitucional que el aforo no se expresa en el sentido hidrológico propio de la medición de caudales, sino en el jurídico, en relación a la determinación de la demanda otorgada, base para considerar si los nuevos usos degradan el contenido de los existentes, y si a partir del conocimiento de caudales disponibles podían ampliarse las zonas de uso. Justamente, ningún sentido tendría la norma si apuntara a determinar una mayor o menor oferta hídrica pero sin saberse qué parte de ella está comprometida y qué parte disponible; y en este sentido, de los debates de la Convención Constituyente que estipuló estos textos surge explícitamente que su espíritu fue tanto el trabar el otorgamiento de nuevas concesiones en perjuicio de los usos ya existentes como el de asegurar la intervención técnico-científica del Departamento General de Irrigación a fin de asegurar que las nuevas concesiones o áreas de riego impliquen el mayor beneficio público (Convención Constituyente de 1915, 1941, p. 449).

De esta forma, surge la categorización jurídica de los usuarios del agua en Mendoza: quienes presentan un derecho de agua que se remonta a la sanción de la ley de 1884 son titulares de carácter "definitivo", y gozan de la prerrogativa jurídica de ser servidos con preferencia a los otorgados con posterioridad. Y al no haberse formalizado hasta el momento el "aforo" de los ríos para los años ordinarios que disponía el art. 128 citado, todas las concesiones otorgadas desde entonces son a título eventual "eventual" (art. 129 citado y art. 194 de la Const. de Mendoza), con lo que deberían ser servidas luego de abastecer a los derechos definitivos y en orden a su antigüedad.

Sin embargo, esta clara distinción legal ha presentado problemas de eficacia y eficiencia. Por un lado, su eficiencia con respecto a asegurar la cláusula sin perjuicio de terceros

ha sido morigerada normativamente, transformando la prioridad de suministro de los derechos definitivos en una provisión incrementada con respecto a la de los eventuales, aunque simultánea en su abastecimiento: a partir de la ley 712 y la Acordada del 5 de julio de 1929 del Tribunal Administrativo del Departamento General de Irrigación todas las concesiones, sean eventuales o definitivas, son abastecidas en forma simultánea, aunque con un coeficiente diferencial en el que los definitivos reciben mayor caudal.

Dicha Acordada dispuso que la dotación de los canales se fijará en forma proporcional en base a un coeficiente diferencial, de modo que el volumen de los derechos definitivos se abastece en función de un coeficiente 1, mientras que a los derechos eventuales se le aplica un coeficiente de 0,8 a 0,4 según su antigüedad; lo que en la práctica implica que estos últimos deben recibir una dotación de entre el 40 y el 80% de lo que corresponde a un derecho definitivo, aunque la reciben en igual oportunidad que aquellos.

Cabe aclarar, sin embargo, que más allá de tal distingo jurídico entre derechos eventuales, en la práctica la distribución hídrica se realiza en forma uniformada, suministrándose a todos los derechos eventuales en un coeficiente único de 0,80, sin atender su antigüedad, lo que es una situación fáctica que se refleja en los diversos documentos técnicos de Balance Hídricos existentes y se realiza sin ningún tipo de conflicto, lo que indudablemente no puede ser desconocido en la valoración normativa del caso.

De este modo, el régimen actual relativiza completamente las categorías previstas inicialmente en la Ley de Aguas, disponiéndose una distribución permanente a todos los usuarios, aunque asimétrica en volumen según las categorías de uso. Y aunque es evidente que esta solución modula la estabilidad del contenido original de los derechos definitivos otorgados bajo la Ley de Aguas de 1884, escudriñada judicialmente tal medida en forma constante y reiterada se ha resuelto que "no es repugnante a la sistemática del derecho de aguas mendocino la existencia del derecho eventual equiparado por las leyes anteriores comentadas (nº 430, 712, 804 y 930) al derecho definitivo de riego" (SCJM, 1977, 2011a y 2011b), afirmándose además que tal esquema se justifica por la perturbación al orden público que se generaría al negar todo suministro a los derechos eventuales mientras se estuviera abasteciendo a los definitivos (Cano, 1967, p. 28).

Así, el uso del agua quedó jurídicamente fijado en forma tal que ya no existe una preferencia temporal en la que los usos definitivos deben ser servidos antes, y los eventuales luego y en orden de antigüedad. El sistema lleva a que mientras no se realice el aforo -y subsistan las categorías referidas- todos los usuarios son abastecidos simultáneamente, aunque con un volumen diferencial.

Pero, además, la posibilidad de aumentar la cantidad de derechos eventuales mediante nuevos otorgamientos tiene un impacto negativo en términos de eficacia de la cláusula sin perjuicio de terceros, ya que -en la práctica- los mismos no solo son abastecidos simultáneamente, sino que además las autoridades no siempre se conducen con la prudencia que requiere la incertidumbre propia de la falta de aforo. Solanes y Getches (1998, p. 16), en este sentido, cuestionan que en ciertas ocasiones "existen limitantes derivadas

de la excesiva politización de actividades esencialmente técnicas", y ponen el foco en un caso en concreto, cuando las autoridades provinciales gobernantes en 1997 intentaron "otorgar derechos de agua, bajo leyes de presupuesto dejando de lado la normativa y las instituciones al respecto, mediante excepciones *ad hoc* en un área de escasez y sobreasignación de recursos".

9.3.1.2.2 La anomalía de la registración y distribución por hectáreas registradas

Otra consecuencia de la falta de concreción del procedimiento de aforo se refleja en la registración y distribución del agua para su uso. Como se refirió, al dictarse la Ley de Aguas de 1884 se procedió a empadronar las hectáreas irrigadas (art. 103 LA), y a disponer que debía establecerse el volumen que corresponde a cada concesión -con un límite máximo para por hectárea para el caso de los usos agrícolas- (art. 122 LA).

Así nació un sistema registral basado en las hectáreas irrigadas, en el que la extensión o "medida" de los derechos se expresó formalmente en una superficie, sin relación concreta de esas superficies inscriptas con respecto a las necesidades de agua que -según el tipo de suelo, clima, cultivo, sistema de riego, etc.- era necesaria para satisfacer la demanda que el derecho inscripto generaba. Al no haberse cumplido el aforo del volumen que corresponde a cada derecho, el registro hasta la actualidad se mantiene por superficie, y el total del agua disponible en cada año es distribuida en forma proporcional entre todos los usuarios registrados en función de las hectáreas empadronadas y sin atender la mayor o menor necesidad de cada caso (Pinto, 1999).

Es decir, existe una distribución que lejos de realizarse en base a las normas que requieren la fijación del volumen necesario para el uso concedido, se hace en base a reglas excepcionales de la distribución proporcional que debería hacerse en épocas de extraordinaria escasez (Pinto, Andino y Rogero, 2019, ps. 57 y 138; Martín y Pinto, 2015). La distribución, entonces, no responde a la necesidad técnicamente establecida, sino a una parte alícuota del caudal disponible, sin atender si se trata de un año ordinario o de caudales escasos. Pero esto acarrea una serie de anomalías contraproducentes.

Por una parte, la distribución se realiza en forma ajena al volumen que los derechos necesitan técnicamente, con lo que incluso sin escasez se prorratea entre todos los usos empadronados el caudal disponible incluso por encima de las necesidades agronómicas, contrariando las recomendaciones internacionales que desde hace décadas se realizan con respecto a asignar el agua de acuerdo con los requerimientos reales y no según superficie (CEPAL, 1991; GWP, 2000).

De esta forma, cada usuario de uso agrícola recibe un caudal proporcional a la extensión de superficie registrada, aunque no todos logran con ese volumen el mismo rinde en el regadío: aquellos con sistemas menos eficientes o cultivos más demandantes riegan

muchas veces una superficie menor que la empadronada, mientras que otros -a pesar de recibir la misma proporción de agua- abarcan superficies que en ocasiones son más extensas que lo empadronado.

Incluso, la superficie de un Cuadro de cultivo puede depender de aspectos tan contingentes como la mayor o menor distancia que entre sí presentan las plantas o las hileras de un viñedo o una quinta, lo que puede variar en función de necesidades agronómicas totalmente ajenas al uso del agua -como por ejemplo lograr mayor exposición solar, permitir el ingreso de cosechadoras mecánicas u otras maquinarias, adaptación orográfica etc.- (Pérez Bartolomé, 2002; CIREN, 2018). Y consiguiente la superficie del Cuadro de cultivo a irrigar no guarda una relación directa con la cantidad de plantas irrigadas o los metros de reguera que integran su sistema de riego, con lo que predios con idénticas variables de uso del agua pueden presentar superficies muy distintas.

Esta situación, que define la extensión del derecho en función de una superficie y no del volumen, lleva a circunstancias injustas que desalientan el uso eficiente del agua y la inversión en tecnología para ampliar el rendimiento por unidad de agua disponible (Cano, 1969, p. 552 y ss.). Así, por ejemplo, aquellos regantes que por un uso eficiente del agua -o incluso por exigencias de su estrategia o técnica agronómica- se extienden más allá de las hectáreas empadronadas caen en una situación de ilegalidad, y son sancionados por desarrollar cultivos clandestinos (Ley 1920).

Junto a ello, el volumen del agua prorrateada entre los usuarios no es uniforme en función de la superficie empadronada. En parte porque -según se analizó *supra*- dentro de las categorías de derechos definitivos y eventuales hay una asignación volumétrica diferencial por hectárea según el derecho de que se trate; y en parte porque el volumen que corresponde por hectárea en cada cuenca varía de un caso al otro, ya que en definitiva depende de la disponibilidad y cantidad de hectáreas empadronadas en cada caso.

Y con ello, no solo la cantidad de hectáreas inscriptas no guardan una relación lineal ni con el volumen requerido, ni con el volumen realmente usado en cada caso; sino -además- el sistema de registración por superficie genera diferencias contingentes y sin fundamentación técnica en diversos otros aspectos, como en el tratamiento tributario, dándose lugar a una distribución de costos por uso del agua que es inequitativa en función del volumen verdaderamente suministrado o utilizado (Pinto, 1999; Andino, 2016, p. 129), impidiéndose asignar al sistema de contribuciones una función parafiscal vinculada al incentivo del uso racional y eficiente (Pinto, 2009).

Pero además, la falta de una asignación volumétrica ha llevado a que todos los usos se asimilen al predominante -agrícola- y consiguientemente se registren por superficie, en hectáreas, incluso cuando tal modalidad es absurda e inconsistente con las características del uso otorgado, como ocurre en el caso de empadronamientos de concesiones para generar hidroelectricidad, abastecer poblaciones con agua potable, o realizar utilizaciones industriales, todos ellos casos en los que no hay relación entre el consumo y la superficie del establecimiento o del área servida.

Con seguridad, la situación descripta conlleva -en el mejor de los casos- una dificultad y falta de transparencia en la información registral, ya que enmascara los volúmenes concedidos haciendo dificultosa la percepción de los mismos en el análisis y decisión de las políticas públicas. Pero, además, impacta en forma negativa en el sistema de distribución y tributación, haciendo que las mismas no respeten ni considere las necesidades y usos reales ni incentive a los usuarios a realizar una aplicación eficiente del agua.

9.3.1.3 Determinación del volumen concesional

9.3.1.3.1 Elementos a considerar en la asignación de volúmenes

El resultado primario y consecuencia básica del procedimiento de aforo es que los derechos de aprovechamiento dejan de tener por objeto un volumen indeterminado de agua, definiéndose el volumen concreto asignado a cada uno de ellos.

Esta determinación se encuentra fuertemente dentro de la órbita de discrecionalidad técnica de la Administración, con lo que en gran parte el criterio técnico y las variables que se consideren pueden presentar una diversidad amplia de opciones.

Aun así, la legalidad impone ciertos elementos a tener en cuenta para la fijación técnica del volumen. En parte, los textos normativos brindan de manera explícita ciertos parámetros básicos que deben ser tenidos en consideración. En este sentido, queda claro que en el procedimiento de aforo debe atender que "el uso del agua sea en cantidad suficiente, por hectárea, para llenar las necesidades a que se la destina" (art. 1 Ley 386), atendiéndose "la naturaleza del terreno y clase de cultivos existentes" (art. 10 Ley 430), así como las obras de regulación que permitan un mayor aprovechamiento (art. 195 Const. Prov), no debiendo en ningún caso sobrepasarse el límite máximo establecido en el art. 122 LA.

Pero, además, los antecedentes de tales normas brindan mayores elementos para la formulación del juicio técnico, debiendo recordarse que "es misión del intérprete de la ley indagar el verdadero sentido y alcance de la misma, mediante un examen atento y profundo de sus términos que consulte la realidad del precepto y la voluntad del legislador, pues sea cual fuere la naturaleza de la norma, no hay método de interpretación mejor que el que tiene primordialmente en cuenta la finalidad de aquélla" (SCJM, 2004).

Así, en los fundamentos de la Ley 386 se refiere a "estudios sobre el terreno, régimen de los ríos, clase de tierras, cultivos, canalizaciones" (Civit, 1920a); y en los propios de la Ley 430 se reafirman los expresados y se suman otros: "el estudio de las tierras y clase de cultivos, a que el agua se distribuya en forma metódica, satisfaciendo los servicios a que se la destina y dando a cada uno lo que legítimamente necesite y le corresponda, [„] la cantidad de agua normal que requiere un terreno y un cultivo determinado, [no debiendo] otorgar aprovechamientos de agua en cantidad mayor o menor a la necesaria por hectárea, desde que varía según la naturaleza del terreno y clase de cultivo" (Civit, 1920b).

De este modo, la demanda hídrica que generan los derechos otorgados surgirá de aspectos como el tipo de suelo y los cultivos característicos de cada zona y las posibilidades que brindan las obras de regulación para generar un uso sustentable del recurso; pero también de la cantidad de agua que normalmente requiere el uso otorgado para sus necesidades.

Esto último debe precisarse, ya que esa cantidad puede cambiar significativamente según la tecnología de aplicación y cómo se la gestiona en cada caso, lo que presenta una movilidad notoria en el universo de usuarios, con sistemas de riego cuyas eficiencias varían según se trate de los tradicionales como melgas o surcos, o tecnificados como goteo o aperción (Schilardi et al, 2017).

En todo caso, el supuesto tecnológico que se adopte debe responder a parámetros generales y objetivos que descarten arbitrariedades, y en especial inconsistencias en el tratamiento de casos particulares, siendo la razonabilidad lo que debe guiar en la determinación, de modo que se descarten sistemas que -como el riego por inundación- actualmente no puedan justificarse desde la obligación constitucional de usar racionalmente los recursos naturales (art. 41 CN), pero también sistemas de eficiencias muy deseables pero que se encuentran fuera de las capacidades económicas que en general presentan los usuarios para su implementación.

Debe tenerse en cuenta, además, que la operación de aforo no implica asignar a los derechos existentes volúmenes hídricos por encima de sus necesidades incluso si existiera disponibilidad para hacerlo. En todo caso, una vez practicado el aforo y determinada la existencia de sobrantes que permitan un mayor aprovechamiento del agua deberá determinarse la conveniencia de ampliar los usos existentes en cada zona o generar áreas nuevas, según estipula el art. 195 de la Carta provincial (Pinto, 2001)[23].

Finalmente, un factor que inevitablemente incidirá en el análisis es la categoría a la que corresponden los derechos de aprovechamiento, es decir si son eventuales o definitivos. Esta variable es de suma importancia para el supuesto en que la disponibilidad hídrica resulte insuficiente para abastecer plenamente todos los derechos, ya que, si bien en principio los derechos definitivos deberían ser considerados prioritariamente en la satisfacción de sus necesidades, sin que los eventuales puedan afectarlos, el marco jurídico expuesto *supra* conlleva que no pueda entenderse que tal afectación se produce bajo el régimen de la Ley 712, la Acordada de 1929 y su convalidación judicial, donde los derechos eventuales han sido equiparados a aquellos, aunque con un coeficiente de asignación volumétrica diferencial.

23 La misma Convención Constituyente de 1915 (1941, p. 450) se expresó al respecto: " la mejor forma de aprovechar el agua es utilizándola en las zonas y parajes en que se pueda usar con un mayor y mejor rendimiento: es decir, que si con una dotación de cien metros cúbicos de agua -por ejemplo- se riega un número determinado de hectáreas cuando el río sale de la montaña, estos mismos cien metros cúbicos de agua no alcanzarán a regar ese número de hectáreas cuando se trate de otra parte del mismo río; entonces, no ganará nada la riqueza pública haciendo ciertas clases de concesiones de agua".

Esto implica que si bien en el análisis técnico debe aspirarse a una igualación volumétrica de todos los derechos -sin distinción de categoría-, si ello no fuera posible -por no permitir la disponibilidad cubrir a todos según sus necesidades por el total de hectáreas empadronadas-, la asignación debe respetar el contenido mínimo diferencial que establece el referido régimen. Y una vez que los definitivos han cubierto el total de sus necesidades, recién es posible ampliar el caudal de los eventuales "hasta la cantidad de agua que resultase disponible" (art. 10 Ley 430) y así reducir -y de ser posible eliminar- la diferencia de volumen entre ambos.

Por ello, convertir los derechos eventuales en definitivos no necesariamente implica una mayor cantidad de agua -por unificación de coeficientes de distribución- en la dotación respectiva (Pinto, 2001), aunque ello puede ocurrir si las necesidades reales de los usos y disponibilidades lo permiten.

9.3.1.3.2 La oferta y disponibilidad hídrica a considerar

Si el régimen de otorgamiento de derechos tiene por eje evitar que se sobrepase la capacidad de carga de un sistema hídrico, una de las variables básicas del mismo es la determinación de la oferta y disponibilidad hídrica.

Cuantificar el volumen que escurre por los cauces en forma periódica es uno de los deberes explícitos que corresponden a la autoridad del agua (arts. 191 y 196 LA), y tal labor evidentemente se entrelaza con la fijación del volumen que corresponde a cada derecho de uso (Pinto, Andino y Rogero, 2019, p. 210).

La cuantificación de la disponibilidad de agua es importante en torno al procedimiento de aforo, tanto en su desarrollo como luego de concluido. En su desarrollo, ya que es la disponibilidad hídrica lo que permitirá -según se desarrolló en el acápite previo- equiparar totalmente el volumen de los derechos eventuales y definitivos, o asignar un volumen diferencial entre ellos cuando la disponibilidad no permite la total satisfacción de todos. Y luego de concluirse el aforo, para determinar si existen sobrantes que permitan otorgar nuevos derechos, e incluso para establecer la base de la distribución en años hidrológicamente extremos, sea por situaciones de carestía o abundancia.

A los fines del aforo, dicha cuantificación de la disponibilidad, de acuerdo al art. 128 LA, debe realizarse en función del caudal propio de los años ordinarios. El texto legal en este punto es específico en cuanto a que el cálculo de oferta no debe realizarse a partir de la mera consideración del caudal medio u otros criterios hidrológicos, sino que como un estándar legal se fija que el caudal debe ser el de los años ordinarios.

La diferencia es sustancial, ya que mientras el caudal medio implica en principio un cálculo de la media aritmética realizado sobre toda la serie de información hidrológica disponible (Zucarelli, 2017, p. 17), el caudal propio de años ordinarios conlleva un análisis

previo de normalidad[24], lo que exige una metodología distinta, donde dentro de la discrecionalidad técnica debe acudirse a un criterio que permita descartar periodos temporales que resulten hidrológicamente extraordinarios o anómalos, como ocurre por ejemplo en ciertas fases altas o bajas del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (Caviedes y Waylen, 1998; Rojas, Sironi y Martín, 2023).

Es decir, la ley manda que la disponibilidad para considerar el volumen con que deben ser dotados los derechos otorgados según la demanda que implique satisfacerlos, o para decidir si existen excedentes para otorgar nuevos derechos, no debe ser la de un caudal extremo, no representativo de la normalidad de los escurrimientos. Lejos de atenderse un simple promedio hidrológico que pondere dentro de su contenido situaciones extremas anormales, es necesario establecer técnicamente una pauta de normalidad, es decir, lo que es habitual y representativo de la realidad hidrológica cotidiana del cauce, distinguiéndo del análisis aquellos años que no resulten característicos por ser hidrológicamente extraordinarios.

El Departamento General de Irrigación, a partir de la metodología propiciada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2017), se encuentra desarrollando una metodología específica para establecer índices de derrames y caudales estándar, que permitan determinar aquellos que corresponde a los años normales, diferenciándolos de los años de sequía o abundancia. En otro capítulo de esta obra[25] se brinda detalle del Índice de Derramas Estándar (IDE), y su implicancia para determinar el volumen escurrido en un Año Normal; que se identifica con un rango ($-0.3 \leq IDE < 0.30$) dentro del cual -a los fines del aforo- puede adoptarse el valor medio para el Año Ordinario, o sea, $IDE = 0$.

Debe aclararse además que la oferta bruta de agua no refleja la disponibilidad efectiva de la misma. La norma en análisis establece la necesidad de que el aforo establezca la existencia de un sobrante que permita cubrir el caudal solicitado, lo que exige sumar dos factores de consideración.

Por una parte, debe atenderse la disponibilidad hídrica efectiva en el área en la que se realiza el uso del agua, y no una disponibilidad teórica establecida por mediciones en estaciones ubicadas en zonas distales o remotas que se encuentren retiradas. Sobre los caudales registrados en estas últimas incidirán variables como la infiltración o la evaporación que se produce desde el punto de medición hasta el sitio de distribución, lo que llevará a una menor disponibilidad del agua, y por tanto tales aspectos debe ser incorporado en el cálculo técnico que se realice.

Y, por otra parte, debe considerarse la ponderación de la información disponible en cuanto a pronósticos climáticos futuros y su incidencia esperada en la disponibilidad de caudales.

24 El Tribunal Supremo español ha tenido la oportunidad de pronunciarse ante una norma idéntica a la mendocina que contenía la vieja ley de aguas de ese país, entendiendo que existe una equivalencia entre años ordinarios y años normales (Álvarez Rico, 1969).

25 Capítulo 1: "Gestión de la Sequía: Índices Climáticos".

Frente a estudios que pronostican la disminución de la cantidad de nieve y la escorrentía superficial en la provincia de Mendoza y otras (Rivera et al, 2020; Bonisegna, 2015), sería irrazonable y arbitrario eludir un enfoque prospectivo y otorgar nuevos caudales que se extendieran más allá de la posibilidad de abastecerlos sin afectar el objeto de las concesiones y permisos preexistentes.

9.3.1.4 Aplicación de los conceptos analizados

A fin de ilustrar la aplicación de los conceptos referidos, simplificaremos el análisis en un supuesto ejemplificativo limitado a cuatro p ropiedades de tamaño y categorías de derecho variados, ubicadas en tres sectores distintos de una misma cuenca, así como a diversos ejemplos de año ordinario con distintos valores de disponibilidad hídrica que en ocasiones están por encima de la demanda que implican los derechos concedidos, y en ocasiones por debajo.

9.3.1.4.1 Determinación de la demanda de los derechos otorgados

El cálculo de la demanda refiere a la cantidad de agua necesaria en cada caso para satisfacer la superficie de cada cultivo, con la eficiencia de aplicación adoptada como razonable.

En el ejemplo en análisis, el hipotético universo en consideración corresponde a cuatro propiedades de distinto tamaño, con derechos de aprovechamiento del agua de diversas categorías, en algún caso derecho definitivo y en los otros derechos eventuales.

Las mismas se encuentran ubicadas en distintas zonas de una cuenca, cada una de ellas con tipos de suelo y cultivos característicos distintos a las otras, lo que genera una demanda relativa desigual con respecto a cada unidad de superficie correspondiente otro empadronamiento; se asume para el ejercicio que es razonable que todo usuario implemente como mínimo el riego por surco (cuya eficiencia es del 55%).

En el Cuadro 9.1 se explicita la demanda de agua que se requiere para satisfacer cada una de las cuatro parcelas consideradas como ejemplo, según las variables expresadas en relación a cada una.

No se tiene en cuenta, en esta instancia, la categoría del derecho de uso de agua, ya que ella no incide en la demanda agronómica de las parcelas, aunque es un dato -como se desarrolla *infra*- que será de importancia en ciertas situaciones propias de la asignación del contenido a cada derecho de agua.

Cuadro 9.1 Demandas para Aforo

Zona	Sup.	Cultivo	Demanda Neta	Demanda Bruta Efic.= 55%	Demanda Total	Categoría de derecho
A	15 ha	Vid	7 980 m³/ha/año	14 509 m³/ha/año	217 640 m³/año	Definitivo
B.1	15 ha	Vid	6 248 m³/ha/año	11 360 m³/ha/año	170 402 m³/año	Eventual
B.2	10 ha	Olivo	8 467 m³/ha/año	15 394 m³/ha/año	153 938 m³/año	Eventual
C	20 ha	Hortaliza	7 646 m³/ha/año	13 901 m³/ha/año	278 020 m³/año	Eventual
	60 ha				820 000 m³/año	

Fuente: Elaboración propia

9.3.1.4.2 Determinación del contenido volumétrico de cada derecho de agua

Para la determinación del volumen de agua que corresponde al contenido de cada uno de los derechos considerados en el ejemplo debe atenderse que se pueden presentar distintas situaciones hipotéticas, dependiendo de si el volumen disponible en un Año Ordinario es suficiente para cubrir la totalidad de la demanda observada, o si existe cierto déficit en la disponibilidad con respecto a tal demanda. En los puntos siguientes se detalla cada una de estas posibilidades.

9.3.1.4.2.1 Asignación cuando el Año Ordinario supera la demanda

Cuando la disponibilidad del Año Ordinario es mayor que la demanda, es posible brindar un contenido volumétrico a cada derecho que permita satisfacer plenamente los requerimientos de la demanda que al mismo corresponde. E incluso, pueden existir sobrantes o excedentes que permitan asignar un volumen para el otorgamiento de nuevos derechos, según contempla el art. 128 LA.

El Cuadro 9.2 muestra la hipótesis en análisis, es decir, un supuesto en el que la disponibilidad del Año Ordinario (860 000 m³/año) es superior a la demanda de los derechos de uso adoptados como ejemplo (820 000 m³/año).

En este caso, la asignación brindada como dotación a todos y cada uno de los derechos en un año ordinario equivale al total de la demanda correspondiente a la satisfacción plena de los mismos, sin distinguir las categorías de los derechos. E incluso, luego de asignado el volumen correspondiente a cada derecho queda disponible un excedente para ser asignado al contenido de nuevos derechos que se otorguen según regula el art. 128 de la LA.

Cuadro 9.2 Aforo – Año Ordinario mayor que demanda

Demanda		Categoría de derecho	Disponibilidad Año Ordinario	Dotación asignada	Satisfacción de la demanda	Excedentes para nuevos derechos
Zona	Total					
A	217 640 m³/año	Definitivo	860 000 m³/año	217 640 m³/año	100%	40 000 m³/año
B.1	170 402 m³/año	Eventual		170 402 m³/año	100%	
B.2	153 938 m³/año	Eventual		153 938 m³/año	100%	
C	278 020 m³/año	Eventual		278 020 m³/año	100%	
Total = 820 000 m³/año				Total = 820 000 m³/año		

Fuente: Elaboración propia

El supuesto analizado en el Cuadro 9.2 conlleva la equiparación de las dotaciones de los derechos eventuales y definitivos, unificando el volumen que a los mismos se asigna, y la existencia de un sobrante que permitiría -a diferencia de todos los ejemplos que siguen- otorgar nuevos derechos. Esto es posible debido a que el aforo asigna un volumen de agua suficiente a todos los derechos empadronados para satisfacer su objeto, y con ello no se afecta la cláusula sin perjuicio de terceros.

9.3.1.4.2.2 Asignación cuando el Año Ordinario es menor que la demanda

Cuando el volumen correspondiente al Año Ordinario es menor a la demanda, no es posible satisfacer la misma plenamente en relación a todos los derechos empadronados. En estos casos, la cláusula sin perjuicio de terceros impone atender la distinción que la ley establece entre las categorías de los derechos, según sean eventuales o definitivos.

De acuerdo al análisis efectuado *supra*, los derechos "definitivos" presentan una mejor situación jurídica respecto a la cantidad de agua que reciben los "eventuales", existiendo entre ambas categorías una relación volumétrica asimétrica que ha fijado la Ley 712 y la Acordada de 1929, de modo que ambas categorías resultan servidas simultáneamente, pero con un coeficiente diferencial de 1,0 para los derechos definitivos y 0,8 para los eventuales.

En ese marco legal, ante la falta de disponibilidad para satisfacer el total de la demanda, la categoría de los derechos incidirá en la asignación de volumen, generando que la asimetría volumétrica entre ambas categorías que fija la ley determine una proporcionalidad entre los derechos definitivos y eventuales.

Se pueden presentar dos casos en los que el volumen del Año Ordinario es menor a la demanda, los que se verán a continuación.

El Cuadro 9.3 ilustra sobre la asignación de dotación que se produciría en el Caso I en que la disponibilidad del Año Ordinario resultara insuficiente para satisfacer la demanda de los derechos expuesta como ejemplo en este análisis (820 000 m³/año), como ocurría en el caso de que la disponibilidad resultara de 510 000 m³/año.

Cuadro 9.3 Aforo – Año Ordinario menor que demanda – Caso I

Demanda		Categoría de derecho	Disponibilidad Año Ordinario	Dotación asignada	Satisfacción de la demanda	Excedentes para nuevos derechos
Zona	Total					
A	217 640 m³/año	Definitivo	510 000 m³/año	158 673 m³/año	72.9%	0 m³/año
B.1	170 402 m³/año	Eventual		99 387 m³/año	58.3%	
B.2	153 938 m³/año	Eventual		89 784 m³/año	58.3%	
C	278 020 m³/año	Eventual		162 155 m³/año	58.3%	
Total = 820 000 m³/año				**Total = 510 000 m³/año (62.2%)**		

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, en este caso ningún derecho logra satisfacer el total de su demanda, ya que la dotación se asigna con el límite de la disponibilidad del caudal del Año Ordinario. Consiguientemente, solo es posible satisfacer un 62,2% del total de la demanda; pero el volumen asignado a cada uno de los derechos ha respetado la proporcionalidad 1,0/0,8 que establece la Acordada de 1929 entre derechos definitivos y eventuales, y por ello la demanda del derecho eventual es satisfecha en un 72,9%, mientras que la de los eventuales en un 58,3%.

Para visibilizar la proporcionalidad de las dotaciones, en el Cuadro 9.4. se expone la correspondencia existente entre el porcentaje de satisfacción de la demanda propia del derecho definitivo (72,9%) y el mismo porcentaje en los derechos eventuales (58,3%), valores entre los que existe una relación de 1,0/0,8:

$$\frac{1}{0.8} = \frac{100\%}{80\%} = \frac{72.9\%}{58.3\%}$$

Dentro del supuesto en el que el volumen del año ordinario no permite cubrir la totalidad de la demanda puede darse una segunda hipótesis (Caso II). Sería el caso en que, si bien la disponibilidad no permite satisfacer el total de la demanda, sí permite mejorar los derechos, permitiendo que los definitivos satisfagan plenamente sus necesidades, y que los eventuales sean mejorados en relación a los definitivos, aunque sin equipararlos plenamente en sus dotaciones.

Cuadro 9.4 Aforo – Caso II – Satisfacción de la demanda

Demanda		Categoría de derecho	Disponibilidad año ordinario	Dotación asignada	Satisfacción de la demanda	Excedentes para nuevos derechos
Zona	Total					
A	217 640 m³/año	Definitivo	760 000 m³/año	217 640 m³/año	100.0%	0 m³/año
B.1	170 402 m³/año	Eventual		153 429 m³/año	90.0%	
B.2	153 938 m³/año	Eventual		138 605 m³/año	90.0%	
C	278 020 m³/año	Eventual		250 327 m³/año	90.0%	
Total = 820 000 m³/año				Total = 760 000 m³/año (92.7%)		

Fuente: Elaboración propia

Es que en la medida en que la disponibilidad lo permita, debe asignarse un volumen a los derechos hasta cubrir la demanda que los usos concedidos generan; y por ello, una vez alcanzado el volumen total para satisfacer plenamente la demanda de los derechos definitivos, la disponibilidad debe asignarse a los eventuales, lo que permite mejorarlos en términos relativos con respecto a los definitivos.

Ese mejoramiento implica que disminuye la diferencia de dotación entre ambas categorías. Si la disponibilidad lo permitiera, podría llegarse al supuesto del Cuadro 9.4, donde son equiparados; pero si ello no es posible, en la media en que la disponibilidad lo permita debería reducirse la asimetría entre las dotaciones de categoría diversa.

En el Cuadro 9.4 se grafica esta situación, donde al derecho definitivo se ha asignado una dotación equivalente a la demanda que al mismo corresponde, asignándose el resto de la disponibilidad a los eventuales. En este caso, la disponibilidad del año ordinario (760 000 m³/año), aunque no permite satisfacer plenamente la demanda que generan los usos propios de los derechos eventuales, si ha permitido reducir la diferencia entre la dotación de éstos y la de los derechos definitivos, quedando entre ellos una relación de 1,0/0,90.

9.3.2 Consecuencias de la implementación del aforo

La concreción del aforo importa establecer el volumen que corresponde a cada uso especial, especificando su objeto en relación a una cantidad de agua determinada. Esto repercute en un sinfín de situaciones fáctico-jurídicas, que deben dejar de gestionarse en un marco de incertidumbre e hipótesis, para pasar a un abordaje signado por la objetividad de los volúmenes comprometidos en los derechos existentes.

En los siguientes puntos se analizarán las principales consecuencias que genera el aforo de los derechos.

9.3.2.1 Transformación de los derechos eventuales en definitivos

Un primer aspecto a considerar es el impacto que el procedimiento de aforo presenta con respecto a las categorías de derechos hasta ahora existentes. Aforar es asignar un volumen de agua a cada uso especial otorgado, y consiguientemente la medida del mismo ya no será un volumen indeterminado sustituido por la registración de una superficie. Esto impacta sustancialmente en las categorías de derechos existentes, donde la distinción entre eventual y definitivo se creó en el marco de una incertidumbre sobre las disponibilidades y asignaciones, pretendiéndose que los primeros no fueran abastecidos en perjuicio de los segundos.

Consiguientemente, al presentar cada derecho un volumen determinado explícitamente, la regla de la precedencia temporal carece de sentido, y la diferenciación de categorías perderá entidad y quedará obsoleta. Por ello el régimen contempla la transformación de los derechos eventuales en definitivos.

Como base del sistema legal, la norma constitucional -a *contrario sensu*- fijó que una vez concretado el aforo las concesiones dejan de tener el carácter eventual que forzosamente tenían antes del aforo, y se determinarán las áreas donde se concretarán los nuevos usos en el caso de que fuera posible ampliar los aprovechamientos.

Con mayor precisión, la Ley 430 estipula que las concesiones eventuales mantendrían tal carácter "mientras no se verifique el aforo de los ríos y arroyos y se determine la cantidad de agua que corresponde por cada hectárea, según la naturaleza del terreno y clase de cultivos existentes"; y con ello, cuando el procedimiento de aforo determina esa cantidad tales concesiones dejan de ser eventuales.

Dicha Ley 430 es más específica aun cuando establece que "sólo se hará el empadronamiento con derecho definitivo una vez verificadas las operaciones referidas y hasta la cantidad de agua que resultase disponible", dejando en claro que una de la consecuencia del aforo es la integración de los derechos en una única categoría. Este es el mismo esquema que estipulado desde la Ley de Aguas de 1884, donde la calidad de derecho definitivo o eventual surge de la posibilidad de usos sin afectar la cláusula sin perjuicio de terceros (arts. 22, 128, 129 y conc.).

Cabe aclarar, sin embargo, que en los supuestos en que el Año Ordinario no se logre satisfacer plenamente la demanda necesaria para cubrir las necesidades de los derechos, como ocurre en los casos ejemplificados *supra* en el Cuadro 9.4, será necesario contemplar la subsistencia como eventual del remanente de la demanda que no ha sido satisfecha, a efectos de su cobertura en los años ricos -abundantes- en los que exista caudal suficiente para ello, aspecto que detallaremos *infra* al analizar la distribución de caudales luego del procedimiento de aforo. Esta máxima, si bien es prevista en el art. 10 de la Ley 430 solo en referencia a los derechos eventuales, es una solución que debe extenderse también a los definitivos por prerrogativas de mayor preferencia bajo la cláusula sin perjuicio de terceros.

Finalmente, debe atenderse que en la medida en que solo se practique el referido aforo y se determine el volumen de correspondiente a cada uso -según ordena el art. 122 LA-, es decir se establezca el volumen de los derechos ya otorgados sin producir alteración alguna a los títulos de los mismos, no se requerirá modificar ni reasignar derechos, y por tanto no corresponderá el trámite legislativo previsto en la Ley 6105. Por el contrario, y de conformidad a las previsiones explicitas del art. 10 de la Ley 430 y de la Ley 7444, el resultado de la operación de aforo debe directamente reflejarse en las inscripciones y adecuaciones que correspondan en el Registro Público de Concesiones.

9.3.2.2 Impacto en el otorgamiento de nuevos derechos: cuencas agotadas y nuevos usos

Una consecuencia definida explícitamente en la legislación (art. 128 LA; art. 23.3 Ley 4035), es que, si del aforo surgiera que los volúmenes ya otorgados comprometen la totalidad de la oferta disponible, entonces no deben otorgarse nuevos usos. Y como contrapartida, si el volumen correspondiente a los derechos existentes se encuentra plenamente satisfecho con la oferta disponible, es posible otorgar nuevos derechos sobre los volúmenes sobrantes.

Esto lleva a considerar el supuesto de cuencas jurídicamente agotadas, es decir aquellas en las que no existe disponibilidad actual para abastecer nuevos derechos, ya que las concesiones preexistentes comprometen totalmente la disponibilidad ordinaria (Vergara Blanco, 2014, p. 345). En este sentido, las concesiones de agua pueden asociarse con la capacidad de la fuente para suplir las necesidades de una población, y por esto, cuando en el procedimiento de aforo la asignación de los caudales sobrepasa los caudales observados en una fuente, las concesiones permiten identificar las fuentes agotadas (Roa García, 2014, p. 313).

Si bien las normas siempre contemplan la imposibilidad de otorgar nuevos usos en perjuicio de los derechos ya existentes como una regla genérica a considerar en todo trámite, en algunos casos también regulan que la imposibilidad de otorgar nuevos usos puede declararse en concreto con respecto a una fuente específica por estar agotada su disponibilidad[26].

La declaración de agotamiento de fuentes transparenta la falta de disponibilidad, lo que de alguna forma limita la presión sobre el recurso mediante trámites individuales que, en ocasiones, pueden prosperar indebidamente hacia la tragedia de los bienes comunes (Pinto, Gennari y Riera, 2023). Esto es justamente lo que ocurrió con el régimen de los

26 Este es el caso, por ejemplo, del art. 281 del Código de Aguas de Chile, del art. 77 de la Ley de Aguas de Perú; o en Argentina del art. 23 de la Ley de Aguas Subterráneas de Mendoza y los arts. 123 y 129 del Código de Aguas de San Juan.

usos eventuales en Mendoza, donde originalmente se otorgaban para existir "con las intermitencias debidas a la carencia o la disminución del agua", de modo que únicamente serían servidos una vez satisfechos los derechos definitivos (arts. 20, 22, 56 y 129 LA), y finalmente ambos terminaron siendo servidos en forma simultánea sin atenderse las épocas de carencia que impedían abastecerlos sin perjuicio de terceros.

Ante ese tipo de situaciones se ha observado que, cuando no se produce la declaración de cuencas agotadas, la falta de visibilidad de la escasez de agua invita a cuestionar el papel que están jugando las concesiones como mecanismo para asignar un bien común cada vez más escaso (Roa García et al, 2015, p. 65), ya que en definitiva, si las mismas continúan siendo otorgadas, dejan de ser un instrumento eficaz para evitar la tragedia de los recursos comunes frente a la sobreexplotación del recurso.

Bajo los conceptos expuestos previamente, no hay dudas de que -si en función del volumen definido en el aforo para los derechos existentes- resultaran sobrantes disponibles para nuevos usos, no existen inconvenientes para que los mismos sean objeto del correspondiente trámite de otorgamiento, siempre hasta el límite de disponibilidad que implica no afectar el volumen correspondiente a los derechos existentes.

En cambio, cuando en base al procedimiento de aforo se determinara que no existen sobrantes para nuevos usos, se debería declarar formalmente agotada la cuenca y restringirse el otorgamiento de nuevos aprovechamientos del agua, con la sola excepción de aquellos casos en que se ha producido la recuperación de parte del caudal concedido a través del procedimiento revocatorio que fija el art. 117 LA, u otros mecanismos alternativos como los que se han desarrollado en base a la ampliación de disponibilidad por obras de eficiencia -que en la provincia de Mendoza se ha desarrollado en el llamado "Fondo Potrerillos" (Resolución 175/99 HTA)-.

Una vez que exista certidumbre en cuanto a que el agua no es suficiente para nuevos usos, otorgarlos bajo la fantasía de que solo serán efectivos en épocas de sobrantes extraordinarios sería incurrir en recetas que en el pasado han fracasado, siendo esperable que vuelvan a fracasar, generándose la tragedia de los bienes comunes en perjuicio de todos los interesados. Como dice la conocida frase atribuida a Albert Einstein: "La locura es hacer lo mismo una y otra vez de nuevo y esperando resultados diferentes".

El impedimento de otorgar nuevos usos eventuales cuando se ha producido el agotamiento jurídico de la cuenca actualmente es impuesto como una exigencia constitucional, y ha sido desarrollado explícitamente en Mendoza en algunos regímenes específicos -como el art. 23 de la Ley 4035-. Y si bien el régimen de 1884 autorizaba inicialmente a seguir otorgando eventuales "cuando del aforo resulte no haber sobrante de aguas en años ordinarios" (art. 129 LA), lo cierto es que con la sanción de los arts. 195 y 195 de la Carta Magna se ha alterado tal posibilidad.

La inteligencia de estos preceptos es clara en la voluntad del constituyente en cuanto a que luego del aforo no se justifica otorgar derechos eventuales en perjuicio de terceros: "Una vez hechos los estudios necesarios, que llevarán 5, 6 o 10 años de trabajos, sobre

el terreno, para ver el modo y manera de utilizar mejor el agua, habrá desaparecido la razón para acordar concesiones particulares en la forma que establece este artículo [por el actual art. 194], y entonces habrá llegado la oportunidad de que entre de lleno en vigencia el art. 199 [por el actual art. 195]" (Convención Constituyente de 1915, 1941, p. 450).

9.3.2.3 La distribución de caudales luego del procedimiento de aforo

A partir de la asignación de una dotación a cada derecho (aforo), la distribución en cada temporada siguiente debe ser ajustada al nuevo estadio jurídico producido.

Hasta el momento, y al no existir una cuantificación del contenido de cada derecho, el total del agua disponible se distribuye entre el total de los usuarios, sin atender la necesidad razonable de los mismos o si la temporada o el año tiene más o menos disponibilidad. Se aplican así en forma indiscriminada las reglas que la ley establece para épocas de escasez extraordinaria (arts. 162 y 164 LA), distribuyéndose el agua proporcionalmente entre todos los usuarios.

Luego del aforo de los derechos, la distribución debe realizarse atendiendo la dotación asignada a cada derecho en función de la disponibilidad anual.

Los índices de caudales y derrames estandarizados que ha desarrollado el DGI[27] facilitan contemplar y planificar las acciones y medidas típicas de distribución que deben implementarse en cada año, según la tipología de los mismos. A partir de ellos, es posible planificar de antemano la forma de distribuir el agua según el tipo de año y los usos que deben abastecerse, lo que potencia una mayor objetividad y previsibilidad en el actuar estatal.

Es posible distinguir tres situaciones concretas en torno a la distribución anual que se debe realizar. Una, cuando, según el Índice de Derrames Estándar (IDE), se trata de un Año Normal (- 0.3 ≤ IDE < 0.30); otra, cuando se trata de un año con escasez, o sequía, (IDE < - 0.30) de caudales, es decir, en el que presenta una Sequía Hidrológica; y finalmente, cuando el año es abundante (0.3 ≤ IDE). Estas tres alternativas conllevan ciertas particularidades, las que se analizan a continuación.

9.3.2.3.1 Distribución en Año Normal

Esta es la hipótesis más sencilla, ya que conlleva distribuir a cada derecho el volumen que le corresponde según la asignación realizada en el aforo. El Cuadro 9.5 brinda un ejemplo de este caso.

27 Ver en esta obra el CAPÍTULO 1: "Gestión de la Sequía: Índices Climáticos".

Cuadro 9.5 Distribución en Año Normal

Demanda		Año Ordinario	Resultado del aforo		Distribución anual	
Zona	Total		Categoría	Dotación asignada (satisfacción demanda)	Año Normal	Volumen a distribuir (satisfacción demanda)
A	217 640 m³/año	760 000 m³/año	Definitivo	217 640 m³/año (100.0%)	760 000 m³/año	217 640 m³/año (100.0%)
B.1	170 402 m³/año		Eventual	153 429 m³/año (90.0%)		153 429 m³/año (90.0%)
B.2	153 938 m³/año		Eventual	138 605 m³/año (90.0%)		138 605 m³/año (90.0%)
C	278 020 m³/año		Eventual	250 327 m³/año (90.0%)		250 327 m³/año (90.0%)
Total = 820 000 m³/año				**Total = 760 000 m³/año**		**Total = 760 000 m³/año**

Fuente: Elaboración propia

Puede apreciarse en el Cuadro 9.5 que en los años normales similares al Año Ordinario, la distribución se realiza por volúmenes acorde a los asignados como dotación en el procedimiento de aforo, lo cual es lógico si se recuerda que tal asignación se realizó atendiendo las características propias de un Año Ordinario o normal.

Consecuencia de ello es que todos los derechos verán satisfecha la demanda en el mismo porcentual que se contemplaba al concretarse el aforo.

Cabe recordar que en los índices de caudales estandarizados que elabora el Departamento General de Irrigación a partir de la metodología de la Organización Meteorológica Mundial, los años climáticamente normales presentan caudales dentro de un rango determinado (- 0.3 ≤ IDE < 0.30). Si bien en el ejemplo se ha simplificado el análisis tomando como valor de disponibilidad el mismo que se adoptó como valor para la operación de aforo (IDE = 0), en el caso de que el mismo resulte otro valor dentro del rango referido, debería ajustarse la distribución en forma proporcional al mismo.

9.3.2.3.2 Distribución en años con caudales escasos

Es importante aclarar distintos conceptos vinculados a la escasez y a la sequía. Se define como "escasez" la situación en la que el volumen actual que escurre en el río, es menor al volumen medio histórico. Si este volumen que escurre, a su vez es menor a un "umbral" predefinido, se está en presencia de una escasez extrema o sequía, la que puede presentar distintos niveles de intensidad.

En esta hipótesis, se activa el régimen de distribución estipulado en los arts. 162/167 y 200 LA para situaciones de escasez extraordinaria, es decir, en años en los que se presentan situaciones de escasez y de Sequía Hidrológica.

Las referidas regulaciones actualmente se aplican indiscriminadamente, sin distinguir años ricos o secos. Pero luego del aforo sólo deberían tener lugar para distribuir caudales exiguos en forma proporcional, cuando la disponibilidad de determinado año hidrológico no alcance para satisfacer los caudales asignados en el aforo. El Cuadro 9.6 brinda

Cuadro 9.6 Distribución en Año Escaso/Sequía

Demanda		Año Ordinario	Resultado del aforo		Distribución anual	
Zona	Total		Categoría	Dotación asignada (satisfacción demanda)	Año Escaso o con Sequía	Volumen a distribuir (satisfacción demanda)
A	217 640 m³/año	760 000 m³/año	Definitivo	217 640 m³/año (100.0%)	646 000 m³/año	184 994 m³/año (85.0%)
B.1	170 402 m³/año		Eventual	153 429 m³/año (90.0%)		130 414 m³/año (76.5%)
B.2	153 938 m³/año		Eventual	138 605 m³/año (90.0%)		117 814 m³/año (76.5%)
C	278 020 m³/año		Eventual	250 327 m³/año (90.0%)		212 778 m³/año (76.5%)
Total = 820 000 m³/año				**Total = 760 000 m³/año**		**Total = 646 000 m³/año**

Fuente: Elaboración propia

El análisis del Cuadro 9.6 permite observar cómo en una situación de escasez o de sequía, todos los derechos se ven afectados en forma proporcional (art. 164 LA). Es decir, la dotación asignada en el aforo es reducida en todos los casos en la misma proporción que la merma que presenta el caudal con respecto a un año normal.

En el ejemplo expuesto, la disponibilidad a distribuir (646 000 m³/año) es un 15% menor a la disponibilidad establecida para el año ordinario (760 000 m³/año), por lo que el caudal a distribuir en todos los casos se disminuye en esa misma relación. Puede observarse también cómo la satisfacción de la demanda merma en forma proporcionalmente directa a la ausencia de caudales, situación de fuerza mayor prevista expresamente en el art. 124 LA.

9.3.2.3.3 Distribución en años con caudales abundantes

En años en que los caudales resultan por encima del Año Ordinario utilizado en el aforo, la distribución de los mismos puede satisfacer plenamente el volumen asignado en el mismo, e incluso completar el total de la demanda que implicaban los derechos otorgados.

Esto es así debido a que cuando en la operación de aforo el caudal del Año Ordinario no ha sido suficiente para cubrir la totalidad de la demanda que requerían los derechos empadronados, el régimen actual dispone que el remanente no cubierto por la dotación asignada debe ser satisfecho como eventual (art. 10 Ley 430). Este concepto, implica abastecerlo en la eventualidad de que exista caudal, y con ello en años hidrológicamente abundantes este aspecto debe ser considerado en la distribución, según se esquematiza en el Cuadro 9.7.

Como se observa, en la eventualidad de años de abundancia es posible satisfacer plenamente la demanda que implican los derechos otorgados, llevando a todos a una satisfacción de 100%, entregando una dotación superior a la fijada por la operación de aforo, tal cual habilita el citado art. 10 de la Ley 430.

Cuadro 9.7 Distribución en Año Abundante

Demanda		Año Ordinario	Resultado del aforo		Distribución anual	
Zona	Total		Categoría	Dotación asignada (satisfacción demanda)	Año Abundante	Volumen a distribuir (satisfacción demanda)
A	217 640 m³/año	760 000 m³/año	Definitivo	217 640 m³/año (100.0%)	900 000 m³/año	217 640 m³/año (100.0%)
B.1	170 402 m³/año		Eventual	153 429 m³/año (90.0%)		170 402 m³/año (100.0%)
B.2	153 938 m³/año		Eventual	138 605 m³/año (90.0%)		153 938 m³/año (100.0%)
C	278 020 m³/año		Eventual	250 327 m³/año (90.0%)		278 020 m³/año (100.0%)
Total = 820 000 m³/año				Total = 760 000 m³/año		Total = 820 000 m³/año

Fuente: Elaboración propia

Además, si después de cubierta la demanda de los derechos empadronados aún existiere un excedente -en el ejemplo existen 80 000 m³/año en esta situación-, el mismo dentro del periodo anual en el que estará disponible podría ser asignado discrecionalmente por la Administración, conforme la planificación hidrológica, ya sea para reforzar derechos existentes, otorgar nuevos usos en sustitución de alguna fuente que lo requiera (como por ejemplo las aguas subterráneas), para cubrir necesidades anuales, objetivos ambientales u otros.

Ese excedente anual, sin embargo, no es válido para otorgar nuevos derechos más allá del año hidrológico, ya que esta posibilidad es vedada por el art. 128 LA.

9.3.3 Revisión del volumen concedido

Un aspecto más que debe analizarse es la posibilidad de revisar y actualizar el volumen establecido en la operación de aforo. Gran parte de los aspectos que se deben considerar en el procedimiento de aforo son variables, es decir, que luego de determinado tiempo requieren su verificación, y en su caso la actualización del aforo en base a las nuevas circunstancias.

Un claro ejemplo de esto es el caudal de los años ordinarios. Las variaciones climáticas pronostican que dentro de algunas décadas pueden existir alteraciones que disminuyan la disponibilidad actual (Rivera et al, 2020; Bonisegna, 2015); por ello, y más allá de la ponderación de esta posibilidad en los análisis técnicos, es necesario cada una cierta cantidad de tiempo verificar si el valor resultante del aforo producido mantiene su validez. Lo mismo ocurre con la evolución tecnológica y/o la posibilidad de un mayor acceso a tecnologías de uso eficiente por la generalidad de los usuarios, lo que llevaría a que la misma demanda pueda ser cubierta con menor volumen.

En el moderno derecho comparado se suele contemplar abiertamente la posibilidad de revisión de los usos del agua ya otorgados (art. 65 del TRLA español -Real Decreto Legislativo 1/2001 y arts. 156-160 Real Decreto 849/1986; y en el ámbito nacional, por ejemplo, art. 42 Código de Aguas de Córdoba, art. 40 Ley de Aguas de la CABA; art. 73 Código de Aguas de Salta; art. 32 Código de Aguas de Buenos Aires, entre otros).

Analizando tanto el derecho mendocino como el comparado, Liber Martín explica que "lo concedido es un volumen relativo y no absoluto; relativo a su disponibilidad por parte de la naturaleza y a un parámetro de eficiencia razonable que es dable esperar y exigir del concesionario en relación a una actividad y un momento determinados" (Martín, 2010, p. 230). De allí que se concluye que la revisión concesional es una posibilidad válida en la legislación mendocina (Pinto, 2012; Martín, Andino y Pinto, 2012; Rugoso, 2017, p. 27).

La revisión concesional es la posibilidad de modificar las características de la concesión por situaciones sobrevinientes (López Menudo, 2007, p. 412). Embid Irujo (1999, p. 248) precisa en este sentido que dicha revisión es una técnica para mejorar las formas de asignación producidas en el pasado cuando se advierte su ineficacia o sobrevienen cambios de circunstancias o mejoras técnicas que permiten una mejor forma de aprovechamiento del recurso, siendo una particularización de tal instituto la modificación del volumen concedido con fundamento en que el objeto de tal concesión puede ser satisfecho con un menor volumen (Embid Irujo, 2004, p. 143).

Joaquín López ha explicado al respecto que no existe un derecho a la inmutabilidad del volumen concedido cuando excede las necesidades del uso razonable (1973, p. 38). Y esta consideración es totalmente acorde al ejercicio regular de los derechos que debe primar, especialmente en un ámbito marcado por el interés público que justifica el uso privativo de un bien de dominio público (Brufao Curiel, 2008, p. 44).

Más allá de que en base a los conceptos sostenidos puede afirmarse que dicha revisión es algo inherente al régimen concesional del agua, la Ley 6105 ha dado base a la revisión de los derechos existentes desde el derecho positivo actual (Pinto 2012), lo que debería concretarse.

9.4 REFLEXIONES FINALES

Aforo es una expresión equívoca, con significados que varían según el enfoque con que se la utilice, lo que en muchas ocasiones ha generado sesgos en los abordajes que se realizan. Sin embargo, para una eficiente gestión hídrica es necesario un esfuerzo disciplinar, donde las diversas especialidades dialoguen metodológicamente y generen vínculos de interacción.

Para interpretar adecuadamente las disposiciones legales que regulan el aforo es necesario comprender que desde su desarrollo jurídico el mismo implica un procedimiento para determinar el volumen de agua que aprovechará cada titular de un derecho de uso, es decir, "la medida del derecho". No se trata de la medición de los caudales que escurren -lo que es propio de la acepción hidrológica del término-, sino de aquellos que corresponden al derecho de cada usuario como una prerrogativa jurídica exigible, y que debe ser respetada.

Ese respeto, al igual que el que corresponde a todo derecho, conlleva un estadio de seguridad jurídica. Implica que en la gestión y distribución del agua el Estado respetará el suministro de los derechos otorgados; y que no desgranará tales derechos otorgando más usos que los que admite la capacidad de carga de un cauce. Sin el límite que implica respetar el volumen ya concedido, los derechos son meramente simbólicos, resultan meros "derechos de papel" con un contenido vacío -o vaciable-, y el sistema legal que busca protegerlos pierde toda eficacia.

Esa es la base de todo régimen de otorgamiento de usos especiales: que los aprovechamientos se realicen ordenadamente, sin que se produzca una sobreexplotación que termine por perjudicar a todos los usuarios, y en definitiva a todo el ejido que sostiene la sociedad. Se evita lo que en la teoría económica se conoce como la tragedia de los bienes comunes.

Y para ello, es necesario saber cuánta agua ha sido comprometida en los usos ya otorgados, y cuánta debe ser distribuida a cada usuario según el volumen disponible en cada año. De lo contrario, paulatinamente, los derechos existentes irán siendo menoscabados en perjuicio del conjunto; y esto no cambia con el otorgamiento de los nuevos derechos como eventuales, ya que más allá del nombre y su régimen original, desde hace casi un siglo la legislación habilita en todo momento el suministro de esa categoría de derecho, con lo que en definitiva no tienen nada de eventuales.

Antes del aforo, pueden existir estimaciones de los consumos que de hecho se producen, e incluso cálculos de cómo deberían ser tales consumos. Pero lo cierto es que todas esas elucubraciones son meros razonamientos teóricos bajo ciertos criterios discrecionales, mas no toman entidad jurídica y por tanto pueden cambiar cada vez que cambia el criterio de quien los realiza. No deja de haber cierta subjetividad en expresar un volumen asociado a un derecho de uso que en realidad se encuentra indeterminado. No hay más que una hipótesis de la demanda, pero la misma no se encuentra definida.

Por ello, solo luego de concretarse el aforo de los derechos es cuando verdaderamente la demanda hídrica que los mismos implican deja de ser un supuesto de trabajo. Solo entonces puede realizarse un balance hídrico con datos ciertos para determinar si existen o no excedentes para nuevos usos.

La indefinición del contenido de los derechos lleva a que no existan límites, ni en cuanto a lo que puede consumir cada usuario, ni en relación al otorgamiento de nuevos usos. Nada determina cuál es el beneficio social esperable por cada unidad de agua disponible, quedando el volumen que se otorga en uso y distribuye sujeto al parecer contingente de quien toma en cada momento la decisión, sin seguridad en los criterios de asignación.

Más allá del enfoque desde la seguridad jurídica de los usos otorgados, también puede afirmarse que la falta de cuantificación del volumen concedido lleva a un escenario que facilita la ineficiencia e irracionalidad. En situaciones de indeterminación el agua se distribuye entre todos los usuarios en forma proporcional, sin criterios que atiendan la necesidad real bajo pautas de razonabilidad, y ello desincentiva el uso adecuado. Simplemente

se usa más o menos dependiendo de la cantidad de nieve que precipita, distribuyéndose el caudal existente sin que se determine a ciencia cierta los requerimientos reales de los usos otorgados.

La legislación mendocina ordena desde 1884 que en función de la disponibilidad existente en un año ordinario se debe establecer el volumen que corresponde a cada uso especial concedido. A lo largo de más de 140 años numerosas normas han instado que se concrete el aforo de los derechos, dando pautas sobre los aspectos a tener en cuenta -como el tipo de suelo y cultivo, clima, etc. Y a pesar de ello el aforo aún no se ha producido.

Esa falta de realización del aforo durante largo tiempo llevó a que se instaure un régimen en el que se otorgaron derechos eventuales, los que solo debían servirse si estaban adecuadamente abastecidos los preexistentes. Pero estas regulaciones se modularon, llevando a que todos los derechos se abastezcan simultáneamente, aunque con un coeficiente volumétrico diferencial; lo que en modo alguno evita el riesgo de desgranamiento de los usos preexistente que se supone que es la base del sistema de asignación.

En la actualidad, la convivencia de derechos definitivos y eventuales genera complejidad en el análisis. Ante esta situación, una adecuada implementación de procedimiento de aforo debe partir de la demanda que implicaría abastecer los derechos otorgados; y en base a la disponibilidad existente, analizar cómo asignar la dotación que corresponde a cada derecho.

En el trabajo se expone ejemplificativamente tal mecánica frente a las diversas hipótesis de disponibilidad, ya sea el caso de que los volúmenes del Año Ordinario sean mayores a la demanda de los derechos otorgados, o sean menor a la misma. Se visualiza así la posibilidad de equiparar -total o parcialmente- las dotaciones de los derechos eventuales a los definitivos, tal cual contempla el orden legal.

Finalmente, también se analiza el impacto que tendría la concreción del aforo de los derechos, tanto en lo que refiere al posible otorgamiento de nuevos derechos como en relación a la distribución de caudales en los distintos tipos de años hidrológicos. En tal sentido, la correlación del volumen que corresponde a cada derecho con el volumen de los años normales permite vincular la distribución a índices estandarizados en función de la normalidad climática y de los escurrimientos.

Sin lugar a dudas, la concreción del aforo de los derechos es una labor compleja, donde interactúa fuertemente lo hidrológico y lo jurídico. Y donde más de un siglo de indefinición ha llevado a dificultades evidentes, con un sistema de derechos ya otorgados que deben atenderse en el marco de disponibilidades acotadas. Pero esas dificultades no deben ser excusa para no concretar el trabajo pendiente, ya que el aumento de derechos que indefectiblemente se da con el paso del tiempo solo hará más difícil en el futuro cumplimentar una exigencia legal que es indispensable para una mejor gestión del agua.

9.5 BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Rico, M. (1969), "La jurisprudencia del Tribunal Supremo sobre el procedimiento de concesión de aguas públicas superficiales", *Revista de administración pública*, n° 58, pp. 209-238

Andino, M.M. (2016). Régimen jurídico de la financiación del agua en Argentina, Buenos Aires: UCAR

Bonisegna, J. (2015), "Impactos esperados y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan". En: *Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina*, Santiago: CEPAL, pp. 11-28

Brufao Curiel, P. (2008). La revisión ambiental de las concesiones y autorizaciones de aguas, Bilbao: Bakez

Cano, G. (1967). Reseña Crítica de la Legislación y Administración de Aguas de Mendoza, Mendoza: del autor

Cano, G. (1987), "Transdisciplinariedad ambiental", *Ambiente y Recursos Naturales*, vol. IV, n° 1, FARN, Buenos Aires, pp. 5-9

Cano, G.J. (1941). Régimen jurídico económico de las aguas en Mendoza, durante el período intermedio (1810-1884), Mendoza: Librería de la Universidad

Cano, G.J. (1969), "Aspectos institucionales y jurídicos". En: Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL) y Consejo Federal de Inversiones (CFI), *Los Recursos Hidráulicos de Argentina*, T° 7, Buenos Aires: CFI

Carmelo, G. (2015), Comentario al art. 1426. En: Herrera, M., Caramelo, G. y Picasso, S., *Código Civil y Comercial de la Nación Comentado*, Buenos Aires: Infojus, pp. 139-140

Carrión, R. (2015). Manual de capacitación: medición del agua de riego, Buenos Aires: UCAR

Caviedes, C. y Waylen, P.R. (1998), "Respuestas del clima de América del Sur a las fases de ENSO", *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, vol. 27, n°. 3, pp. 613-623

Celume Byrne, T. (2013). *Régimen público de las aguas*, Santiago: Thomson Reuters

Centro de Información de Recursos Naturales -CIREN- (2018). *Manual técnico productivo y económico para la producción de la vid en la Región del Biobío, bajo condición actual y clima proyectado al 2030,* publicación CIREN N° 214/2017. Disponible en: www.bibliotecadigital.ciren.cl

Civit, E. (1920a), Mensaje de la Gobernación a la Honorable Legislatura de la Provincia elevando el proyecto de la ley 386. En: *Legislación de Aguas*, Buenos Aires: Radaelli, pp. 65-66

Civit, E. (1920b), "Mensaje de la Gobernación a la Honorable Legislatura de la Provincia elevando el proyecto de la ley 430". En: *Legislación de Aguas*, Buenos Aires: Radaelli, pp. 77-81

Comisión Económica para América Latina y el Caribe -CEPAL- (1991). *América Latina y el Caribe: el manejo de la escasez de agua*, Serie Estudios e informes de la CEPAL, n° 82 (LC/G.1660-P), Santiago de Chile: Naciones Unidas

Convención Constituyente de 1915 (1941). *Debates de la Convención Constituyente de 1915*, T° II, Mendoza: Edición Oficial

Dromi, R. (1994). *Derecho Administrativo*, Buenos Aires: Ciudad Argentina

Embid Irujo A. (1999), "El Derecho de Aguas en España: Influencia Europea y Tradición Nacional", *Revista de Derecho Administrativo Económico*, vol. I, n° 2, pp. 243-261

Embid Irujo, A. (2004), "Instrumentos jurídicos de gestión de la demanda en el derecho español de aguas". En: *Derecho de Aguas*, T° II, Bogotá: Universidad Externado de Colombia, pp. 137-162

Embid Irujo, A. (2007), voz "usos comunes del agua". En: Embid Irujo, A. (dir.), *Diccionario de Derecho de Aguas*, Madrid: Iustel, pp. 949-952

Follari, R. (2001), "Estudios culturales, transdisciplinariedad e interdisciplinariedad (¿hegemonismo en las ciencias sociales latinoamericanas?)". En: *Utopía y Praxis Latinoamericana,* año 6, n° 14, pp. 40-47

Global Water Partnership -GWP- (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*, Gobal Water Partnership, TAC Background Papers n° 4, Estocolmo: GWP

Hardin, G. (1968), "The tragedy of the commons", *Science*, vol. 162, n° 3859, pp. 1243-1248

Kemelmajer de Calucci, A. (1993), "Seguridad y Justicia", *Jurisprudencia Argentina*, T° I, pp. 813-821

Kuhn, T. (2004). *La Estructura de las revoluciones científicas*, Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica

López Menudo, F. (2007), voz "concesiones". En: Embid Irujo, A. (dir.), *Diccionario de Derecho de Aguas*, Madrid: Iustel, pp. 386-425

López, J. (1973). Código de Aguas de la Provincia de Córdoba, Córdoba: SEOPSP

Marienhoff, M. (1939). *Régimen y legislación de las aguas públicas y privadas*", Buenos Aires: Valerio Abeledo

Marienhoff, M. (1960). *Tratado del dominio público*, Buenos Aires, TEA

Martín Retortillo, S. (1963). *La Ley de Aguas de 1866. Antecedentes y elaboración*, Madrid: Ediciones Centro de Estudios Hidrográficos

Martín Retortillo, S. (1997). *Derecho de Aguas*, Madrid: Civitas

Martín, L. (2010). Derecho de Aguas. Estudio sobre el uso y dominio de las aguas públicas, Buenos Aires: Abeledo Perrot

Martín, L. y Pinto, M. (2015), "Escasez extraordinaria y derecho de aguas", *Revista de Derecho Administrativo Económico*, N° 20, pp. 147-164

Martín, L., Andino, M. y Pinto, M. (2012), "Mercados de Agua y su implementación jurídica". En: *IFRH 2012: 1° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Ezeiza: Instituto Nacional del Agua

Mishra, M.K. (2023), "Water Governance: effective needs for Sustainable Development". En: *EconStor Preprints 268739*, ZBW - Leibniz Information Centre for Economics, Kiel, Hamburg. Disponible en: https://www.econstor.eu/handle/10419/268739

Moisset de Espanés, L. (2003). *Publicidad registral*, Buenos Aires: Zavalía

Mustapich, José M. (1968), "La seguridad y la certeza en el derecho", *La Ley*, vol. 130, pp. 836-844

Organización Meteorológica Mundial -OMM- (2017). Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas, Genève: OMM

Paoli Bolio, F.J. (2019), "Multi, inter y transdisciplinariedad". En: *Problema. Anuario de filosofía y teoría del derecho*, UNAM, n° 13, 347-357

Pérez Bartolomé, M.A. (2002). Densidad de plantación y riego: aspectos ecofisiológicos, agronómicos y calidad de la uva en cv. Tempranillo (vítis vinifera l.), Madrid: Universidad Politécnica de Madrid

Pigretti, E.A. (1965). *Teoría Jurídica de los Recursos Naturales*, Buenos Aires: Cooperadora de Derecho y Ciencias Sociales

Pimiento Echeverri, J.A. (2010). *Teoría de los bienes de uso público*, Bogotá: Universidad Externado de Colombia

Pinto, M. (1999), "Consideraciones jurídicas para el aumento de la eficiencia hídrica: la dotación volumétrica", *La Ley Gran Cuyo*, T° 1999, pp. 485-495

Pinto, M. (2001), "Transformación de derechos de uso de agua eventuales en definitivos en el régimen jurídico mendocino", *La Ley Gran Cuyo*, T° 2001, pp- 575-584

Pinto, M. (2009), "Régimen económico-financiero del agua en Argentina". En: Embid Irujo, A. (dir), *Régimen económico-financiero del agua. Los precios del agua*, Navarra: Aranzadi, pp. 235-271

Pinto, M. (2012), "Instrumentos jurídicos de gestión de la demanda hídrica en escenarios de escasez". En: *VI Jornadas de Actualización en Riego Y Fertirriego*. Disponible en: https://www.ina.gov.ar/cra/index.php?seccion=12

Pinto, M. (dir); Andino, M.; Rogero, G. (2019). L*ey de Aguas de 1884 Comentada y Concordada*, T° I, Mendoza: Irrigación Edita

Pinto, M. y Buccheri, M. (2017), "Disfuncionalidades en la gestión de los recursos hídricos en Mendoza". En: *Conagua 2017. XXVI Congreso Nacional del Agua. Acta de Trabajos Completos de Congreso*, Córdoba: UNC-Comité Permanente del Congreso Nacional el Agua, pp. 244-245

Pinto, M. y Martín, L. (2015), "Los mecanismos legales de acceso al agua en las provincias áridas del oeste argentino: principios y características comunes", *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Universidad Nacional de Cuyo, vol. 47, n° 1, pp. 145-157

Pinto, M., Gennari, A. y Riera, S. (2023), "Nuevos derechos de uso de aguas públicas en cuencas agotadas. Regulación de mecanismos para ampliar la oferta hídrica". En: García Pachón, M. (comp.), *Derecho de Aguas*, T° X, Bogotá: Universidad Externado de Colombia, pp. 287-320

Real Academia Española -RAE- (s.f.). *Aforo*, *Diccionario de la lengua española*. Disponible en: https://dle.rae.es/aforo

Rivera, J.A., Naranjo Tamayo, E. y Viale, M. (2020), "Water Resources Change in Central-Western Argentina Under the Paris Agreement Warming Targets", *Frontiers in Climate*, vol. 2:587126. doi: 10.3389/fclim.2020.587126

Roa García, M.C. (2014), "Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world", *Water Alternatives Journal*, vol. 7, n° 2, pp. 298-319

Roa García, M.C., Brown, S. y Roa García, C.E. (2015), "Jerarquía de vulnerabilidades de las organizaciones comunitarias de agua en Colombia", *Gestión y Ambiente*, vol. 18, n° 2, pp. 51-79

Rojas, F., Sironi, O. y Martín, F. (2023), "Sequías en Mendoza (Argentina): una mirada sociohistórica desde la segunda mitad del siglo XIX", *Agua y territorio*, n° 22, pp. 147-166

Rugoso, M. (2017), "El principio de inherencia. Análisis. Regulación legal. Particularidades del caso de la Provincia de Mendoza", *Revista RyD - República y Derecho*, vol. II, n° 2, pp. 1-31

Schilardi, C., Martín, L., Rearte, E., y Morábito, J. (2017), "Desempeño actual y potencial de diferentes métodos de riego en Mendoza. Recomendaciones para mejorar el aprovechamiento del agua de riego". En: Pinto, M., Estrella, J. y Gennari, A. (comp.), *Agua y Sociedad*, Buenos Aires: Lajouane, pp. 355-378

Sokolov, A. A. y Chapman, T. C. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía Internacional de investigación y métodos*, Madrid: Instituto de hidrología de España-Unesco. Disponible en: http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf

Solanes, M. y Getches, D. (1998). Prácticas recomendables para la elaboración de leyes y regulaciones relacionadas con el recurso hídrico, Washington DC: Banco Interamericano de Desarrollo

Superior Tribunal de Justicia de Tierra del Fuego -STJTdelF- (2006), *in re Bronzovich Hnos S.R.L. c/ Provincia de Tierra del Fuego s/ Contencioso Administrativo*, sentencia del 20/06/2006

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (1977), *in re Morales Ramón c/ Depto. Gral. De Irrigación p/ Cont. Adm.*, L.S. 147-009

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2004), in re Marón, Alfredo Luis c/ Gobierno de la Provincia de Mendoza p/ Acción Procesal Administrativa, L.S. 344-126

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2011a), in re Keltisur S.A. c/Departamento General de Irrigación s/Acción Procesal Administrativa, L.S. 432-116

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2011b), in re Porolli de Pulenta Liliana Rosa s/APA c/Departamento General de Irrigación, L.S. 432-147

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2012a), *in re Aliaga, Juan Francisco c/ D G Irrigación s/APA*, L.S. 441-81

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2012b), in re Srbovic, Marcelo Alejandro y ot. c/ Departamento Gral. de Irrigación s/A.P. A., L.S. 444-70

Suprema Corte de Justicia de Mendoza -SCJM- (2019), in re Fazio Cayetano c/ Municipalidad de Guaymallén p/Acción Procesal Administrativa, L.S. 591-201

Vergara Blanco, A. (1998). *Derecho de Aguas*, T° II, Santiago: Editorial Jurídica de Chile

Vergara Blanco, A. (2014). *Crisis institucional del agua*, Santiago: Thomson Reuters

Villegas, H.B. (2001). Curso de Finanzas, Derecho Financiero y Tributario, Buenos Aires: Depalma

Villón Béjar, M. (2022). *Hidrología*, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica

Zucarelli, G.V. (2017). Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados, A Coruña: Universidade da Coruña

10 DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN CONTEXTO DE SEQUÍA

Ing. Matías Roselló[28]

10.1 RESUMEN

El capítulo aborda la gestión de la distribución del agua de riego en Mendoza en un contexto de sequía, analizando el sistema desde una perspectiva integral que combina marco teórico, institucional, normativo y operativo.

En primer lugar, se presenta el contexto hidroclimático, caracterizado por la aridez y eventos de sequía prolongada. Este escenario justifica la necesidad de evaluar la gestión de la distribución, entendida no solo como un problema de infraestructura, sino como un desafío de organización, asignación y control del uso del recurso.
Se desarrollan los paradigmas teóricos de la gestión hídrica, contrastando el paradigma hidráulico tradicional con el nuevo paradigma hidrológico. Este marco permite interpretar la situación actual de Mendoza como una etapa de transición, donde conviven esquemas rígidos heredados con nuevas herramientas orientadas a la eficiencia, la flexibilidad y la adaptación.

Luego se analizan los componentes fundamentales de la gestión hídrica: oferta, demanda, asignación y distribución. Se describe la oferta superficial y subterránea, los instrumentos de gestión asociados (balances hídricos y pronósticos de escurrimiento). Se examina la experiencia de modernización de regadíos y sus efectos sobre la demanda a escala de cuenca (situación a tener en cuenta en nuevos proyectos).

28 Ingeniero Civil. Se desempeña en la Dirección de Gestión Hídrica del DGI , en tareas vinculadas a la gestión de la distribución del agua de riego y a la estimación de la disponibilidad hídrica.

Seguidamente, se presenta la organización institucional y el marco normativo que regulan la asignación y distribución del agua en Mendoza, destacando el rol del Departamento General de Irrigación y las Inspecciones de Cauce.

En el apartado de gestión de la distribución, se describen los distintos esquemas operativos (entregas a la demanda y distribución programada) y se analiza su aplicación en la provincia. Se profundiza en la relación entre el turnado convencional y la eficiencia de uso del agua, mostrando cómo la coordinación entre la gestión de la red y el riego intrapredial resulta clave para evitar pérdidas y déficits productivos.

Se introduce la Cuenta de Agua como instrumento central de control volumétrico y gestión adaptativa. Se diferencia su aplicación en la distribución primaria y secundaria, explicando cómo ambas cuentas se articulan jerárquicamente para asegurar coherencia entre planificación y operación.

El capítulo profundiza en la distribución primaria y secundaria, describiendo su marco conceptual y la lógica de programación. Finalmente, se presenta el Sistema Integrado de Distribución y Seguimiento (SIDIS) para la distribución primaria como la herramienta operativa que materializa estos conceptos.

En conjunto, el capítulo muestra cómo la distribución del agua en Mendoza está evolucionando hacia un modelo más flexible, donde la digitalización, la cuenta de agua y la planificación operativa juegan un rol central para enfrentar escenarios de escasez, déficit y sequía, para sostener la equidad del sistema.

10.2 INTRODUCCIÓN

10.2.1 Problemática del tema abordado

La distribución del agua de riego es una tarea compleja que involucra una gran cantidad de actores, todos ellos inmersos en un marco normativo que regula y asigna el agua en función de usos y categorías de concesiones. Esta complejidad en la asignación y distribución se ve atravesada por la característica principal del recurso hídrico: su escasez y su variabilidad en la disponibilidad año tras año.

En la provincia de Mendoza, esta condición estructural coloca al sistema en situaciones críticas cuando se producen sequías prolongadas. La evolución de los derrames históricos de los principales ríos de la provincia para el período 2001-2026 muestra que, a partir del año 2011, se inicia una fase de sequía persistente con escasas excepciones aisladas en las que algún río alcanza valores normales o levemente húmedos. Estas interrupciones puntuales no modifican la tendencia general, por una menor disponibilidad hídrica. La situación descripta se muestra, más que una situación de emergencia, como una realidad donde predominan la escasez y el déficit hídrico estructural.

En paralelo, se ha intensificado la demanda por el uso del agua. El consumo poblacional, la industria, la agricultura, los conflictos interjurisdiccionales de cuenca, el turismo, la generación hidroeléctrica y los usuarios recreacionales en zonas de expansión urbana compiten por un recurso cada vez más escaso.

En este contexto, resulta necesaria una evaluación técnica de la gestión del agua de riego en Mendoza. Esta evaluación de tipo exploratoria permitirá obtener un panorama amplio de la distribución del agua, identificando fortalezas y debilidades del sistema de administración. Asimismo, es relevante incorporar al diagnóstico los mecanismos de adaptación que se han implementado en los últimos años y los resultados observados, a fin de comprender adecuadamente la situación actual y formular propuestas superadoras.

10.2.2 Paradigmas teóricos en los recursos hídricos y su relación con la sequía

Para evaluar el modelo actual de gestión del recurso hídrico en Mendoza y el proceso de flexibilización de la distribución, resulta necesario enmarcar el análisis dentro de los paradigmas teóricos de la gestión de los recursos hídricos.

Tomando como referencia a Pedregal Mateos (2002); las funciones y objetivos de la planificación hidrológica evolucionan con el tiempo, acompañando cambios técnicos, sociales y culturales. En este proceso se identifican dos grandes paradigmas que gobiernan la manera de concebir la gestión: **el paradigma hidráulico tradicional** y **el nuevo paradigma hidrológico**.

El paradigma hidráulico tradicional puede resumirse en la necesidad de proporcionar agua suficiente para todos los usuarios con fines productivos, especialmente para riego. Centrado en la construcción de obras hidráulicas, busca el suministro generalizado de agua potable, el desarrollo de regadíos y la generación hidroeléctrica. Se basa en un modelo de expansión de la demanda y expansión de la disponibilidad de la oferta, por lo que la planificación se orienta a construir infraestructura para abastecer demandas crecientes consideradas exógenas.

Por el contrario, el nuevo paradigma hidrológico surge en un contexto de desarrollo sustentable y conciencia medioambiental. Se apoya en la conservación del agua, el uso sostenible de los recursos, la gestión integrada de la oferta y la demanda, la consideración conjunta de cantidad y calidad, la acción preventiva, la subsidiaridad, la responsabilidad compartida, la integración de políticas vinculadas al recurso, la formación de capacidades y la publicidad de información.

Entre estos dos extremos no existe un tránsito lineal. Pedregal Mateos (2002) describe un itinerario que va desde una vieja cultura del agua, caracterizada por una fase expansionista, hacia una nueva cultura del agua, que atraviesa una fase de transición y una fase madura.

En la fase expansionista, la satisfacción de las demandas se logra mediante la construcción de embalses, obras de toma y trasvases. El objetivo es aumentar la disponibilidad hídrica del sistema. En la fase de transición, las demandas se satisfacen a través de la gestión, comenzando por la mejora en la eficiencia del uso y distribución del recurso y continuando con medidas de asignación o reasignación que buscan maximizar beneficios. En la fase madura, se alcanza una adaptación a la escasez y déficit, pudiendo incluso reconstruirse el recurso natural mediante un uso inferior a su capacidad de recarga, (en el caso del agua subterránea).

En relación con la asignación del recurso, la fase expansionista prioriza los usos urbanos, industriales y agrícolas, con precios bajos o nulos y elevados consumos unitarios. La administración se posiciona como promotora de infraestructura. En la fase de transición surgen exigencias de consumos reducidos, los precios reflejan la falta de recurso y puede existir mayor protagonismo privado, incluyendo mercados de agua. En la fase madura se prioriza la calidad del agua y se incorporan los daños ambientales en su valoración.

Desde el punto de vista de la eficiencia, en la fase expansionista no existe un claro interés en la eficiencia técnica del uso del recurso. En la fase de transición aumenta la preocupación por la eficiencia en el uso y distribución. En la fase madura se generalizan incentivos a la conservación y el ahorro.

10.2.3 Relación entre paradigmas, sequía y flexibilidad en la gestión

La situación actual de Mendoza, caracterizada por una sequía persistente y alta competencia por el recurso, permite analizar el sistema de distribución mediante estos paradigmas.

La persistencia de la sequía obliga a disminuir los volúmenes entregados (se ha llegado a disminuir un 70% las dotaciones), aumentar intervalos entre riegos y reducir la temporada de riego (aumentando los periodos de corta). Este escenario evidencia que la simple expansión de la disponibilidad del agua no es suficiente cuando la oferta natural disminuye de manera sostenida. En este sentido, se podría decir que la problemática abordada se vincula directamente con la transición entre modelos de gestión.

La necesidad de evaluar la gestión actual de la distribución surge de la tensión que se evidencia entre dos enfoques de gestión que coexisten en el sistema. Por un lado, se observan elementos propios de una fase de transición, caracterizados por una mayor preocupación por la eficiencia en el uso y distribución del recurso, así como por la incorporación de mecanismos de asignación y reasignación adaptados a la realidad actual.

Por otro lado, persisten rasgos del paradigma expansionista, donde la estructura normativa y operativa mantiene esquemas rígidos concebidos bajo una lógica de aumentar la disponibilidad. Esta superposición de enfoques revela la existencia de paradigmas en pugna, cuya resolución resulta central para mejorar la capacidad de adaptación.

El problema de la falta de flexibilidad en la distribución se inscribe en esta transición. La adaptación a la sequía no depende únicamente de la infraestructura existente, sino de la capacidad del sistema para gestionar la demanda, mejorar la eficiencia y ajustar la asignación bajo nuevas condiciones de disponibilidad. No obstante, ello no implica restar importancia a la inversión en infraestructura, sino comprender que ésta constituye un componente que permite la mejora en la gestión. La modernización y adecuación de las obras permiten optimizar la operación, reducir pérdidas y facilitar esquemas más flexibles de distribución. En este sentido, infraestructura y gestión no son dimensiones excluyentes, sino complementarias y necesarias para responder a escenarios de sequía.

10.3 ELEMENTOS DE LA GESTIÓN: OFERTA, DEMANDA, ASIGNACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

10.3.1 Introducción

La gestión del recurso hídrico en la provincia de Mendoza se estructura a partir de cuatro componentes fundamentales: la oferta, la demanda, la asignación y la distribución. Estos elementos no operan de manera aislada, sino que conforman un sistema cuyo funcionamiento depende tanto de factores hidrológicos y climáticos como de marcos normativos, institucionales y sociales construidos a lo largo de la historia.

La oferta hídrica constituye el punto de partida del sistema, ya que determina el volumen de agua disponible para ser asignado y distribuido. La demanda, por su parte, expresa las necesidades de los distintos usos, principalmente el riego agrícola, pero también el abastecimiento poblacional, industrial y otros usos reconocidos o tolerados por la legislación. La asignación se encuentra regulada por un conjunto normativo que establece principios de dominio, uso, prioridades y modalidades de otorgamiento de los volúmenes de agua. Finalmente, la distribución materializa en el territorio la entrega efectiva del recurso, mediante sistemas de gestión organizados de carácter primario y secundario, en función de la institución que la realiza.

El análisis de estos cuatro componentes permite comprender cómo se estructura la gestión del agua en la provincia de Mendoza y cuáles son sus condicionantes.

10.3.2 Gestión de la oferta

La oferta hídrica natural, principalmente nival, es un factor hidrológico donde la gestión no puede realizar acciones que la modifiquen, por lo que se presenta como actividad fundamental la medición de la misma, para conocer la cantidad anual a gestionar y la variabilidad a largo plazo que se desarrolla por el cambio climático.

En general, dentro de la gestión de la oferta se incluyen las actividades (infraestructura de regulación, captación, distribución, perforaciones, etc.), que hacen que la oferta natural esté disponible para ser asignada y distribuida a los distintos usos. En Mendoza esta disponibilidad se divide en dos categorías principales: oferta superficial y oferta subterránea. Sin embargo, la gestión de ambas presenta diferencias conceptuales significativas.

10.3.2.1 Oferta superficial

La oferta superficial es un fenómeno hidrológico por excelencia y proviene de ríos y arroyos que tienen su origen en la Cordillera de los Andes y se alimentan principalmente de la fusión de la nieve acumulada durante el invierno, complementada por aportes pluviales y glaciares, en menor medida. Prácticamente la totalidad del agua superficial distribuida por la red de riego proviene de los ríos y arroyos de origen cordillerano, alimentados principalmente por la fusión nival.

No obstante, existe una fuente superficial adicional derivada del uso poblacional: el agua de reúso. Esta constituye la única fuente hídrica con perspectiva de mantenerse en el tiempo e incluso incrementarse, en la medida en que crecen los volúmenes asociados al consumo urbano. Si bien su magnitud es menor en comparación con los derrames naturales, adquiere relativa importancia en la cuenca del río Mendoza, donde su aporte forma una parte representativa del agua disponible.

Por un lado, el Departamento General de Irrigación, a través de las Subdelegaciones de cada río, administra las erogaciones de los embalses, los diques derivadores (azudes) y canales primarios. Por otro lado, las comunidades de usuarios, organizadas en Inspecciones de Cauce, gestionan las redes secundarias y terciarias, realizando las entregas a los agricultores o también a las plantas potabilizadoras de agua. El Inspector de Cauce, elegido democráticamente entre los usuarios del distrito de riego, actúa como autoridad local del canal. Existen casos particulares dentro de la administración del agua superficial, como las aguas de dominio privado, que son gestionadas directamente por el usuario interesado.

Las acciones de gestión de la oferta superficial se orientan principalmente al conocimiento y cuantificación de la misma. Esto se realiza mediante la medición sistemática de variables hidrológicas y meteorológicas que permiten elaborar pronósticos de derrame para la temporada entrante, así como el monitoreo permanente de los escurrimientos.

En lo que respecta a la disponibilidad efectiva, intervienen los embalses reguladores y compensadores, que permiten una regulación estacional de los volúmenes escurridos y almacenados.

10.3.2.2 Oferta subterránea

Si bien el agua subterránea es un bien de dominio público, la infraestructura necesaria para su extracción (la perforación), pertenece al concesionario. Cada usuario que posee una perforación gestiona su extracción de manera independiente, de acuerdo con sus necesidades y demandas.

El Departamento General de Irrigación otorga permisos de perforación considerando diversos factores, tales como el volumen de explotación solicitado y la condición del acuífero en función de su almacenamiento.

A diferencia de la oferta superficial, cuya administración es conjunta y centralizada en distintos niveles institucionales, la oferta subterránea presenta un carácter descentralizado y depende directamente de las decisiones individuales de los concesionarios, sin una gestión integrada con la distribución superficial, salvo en casos específicos de refuerzos de dotación o uso conjunto.

Si bien en este trabajo no se aborda en profundidad la gestión de las aguas subterráneas, se reconoce su peso significativo dentro de la oferta hídrica total provincial.

10.3.2.3 Instrumentos de gestión de la oferta

10.3.2.3.1 Balance Hídrico

El Balance Hídrico constituye una herramienta central para conocer el estado hídrico de las cuencas. Permite cuantificar ingresos, egresos y variaciones en el almacenamiento de los acuíferos y embalses, integrando información de oferta, disponibilidad y demanda con su correspondiente espacialización.

En Mendoza, la Constitución Provincial, en sus artículos 194 y 195, establece la obligación de realizar el aforo de los ríos[29], lo que genera una impronta normativa que determina que la unidad de análisis sea la cuenca hidrográfica y administrativa.

29 Ver el Capítulo 9: EL AFORO DE LOS DERECHOS DE AGUA: PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE VOLÚMENES.

Los Balances Hídricos realizados en 2015 y 2020 estuvieron orientados a determinar el grado de satisfacción de las demandas hídricas, contrastando las ofertas disponibles con los requerimientos para distintos usos.

Metodológicamente, el balance integra:

- Oferta superficial (ríos, arroyos, agua de reúso).
- Oferta subterránea (modelos hidrogeológicos).
- Demanda agrícola y no agrícola.
- Eficiencias de conducción y aplicación.
- Aspectos normativos en la asignación.

Se trabaja espacialmente y operacionalmente con Unidades Administrativas de Manejo (UAM), distinguiendo usos conjuntos, subterráneos exclusivos y otras fuentes.

El Balance Hídrico no solo describe la situación presente, sino que incorpora análisis prospectivos, considerando amenazas climáticas, cambios en el uso del suelo y concesiones otorgadas, variaciones en la eficiencia y posibles adaptaciones en la gestión del sistema.

10.3.2.3.2 Pronósticos de Escurrimiento

Los pronósticos de escurrimiento constituyen la herramienta operativa fundamental para la gestión anual de la temporada, ya que es la base de planificación en distintos niveles institucionales.

Se basan principalmente en la medición del Equivalente Agua Nieve (EAN)[30], obtenido en estaciones nivometeorológicas del Sistema de Información Hidronivometeorológica (SIH). Mediante métodos estadísticos de regresión multivariable, se estiman los volúmenes de derrame anual con un bajo margen de error.

El producto final es una serie de valores de derrame y caudal mensual estimado, insumo indispensable para la planificación de la distribución.

10.3.3 Gestión de la demanda

La gestión de la demanda hídrica se estructura según los usos del agua y las prioridades fijadas por el marco normativo vigente, en el cual los usos poblacionales y estratégicos (ciertos consumos industriales) tienen primacía sobre el riego agrícola.

30 Ver el Capítulo 4: MEDICIÓN DE LA NIEVE EN MENDOZA.

En este esquema, el riego funciona como un uso ajustable, absorbiendo gran parte de las restricciones impuestas por la disponibilidad hídrica, especialmente en contextos de escasez y/o déficit[31]. Esta condición ha orientado las políticas hídricas hacia la modernización de regadíos, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la flexibilidad de los sistemas de riego.

La experiencia internacional muestra que los efectos de la modernización de regadíos sobre la demanda de agua a escala de cuenca no son unívocos, sino que dependen de las condiciones iniciales del sistema y del marco institucional.

En términos generales, pueden identificarse cuatro situaciones típicas tras los procesos de modernización (Berbel et al., 2017):

- **Sistemas deficitarios**: sistemas de riego con dotaciones iniciales insuficientes para cubrir la demanda de los cultivos. La modernización mejora la gestión y mitiga el déficit, pero no genera incrementos significativos de la superficie regada ni reducciones sustantivas de la demanda total.
- **Sistemas con baja eficiencia operativa**: incluye áreas donde la infraestructura obsoleta impide el riego de la superficie total concesionada. La modernización permite regar plenamente dichas áreas, aumentando la superficie efectivamente irrigada dentro de la concesión de cada usuario, con variaciones menores en la dotación total y posibles incrementos del consumo agregado.
- **Sistemas adecuadamente dotados:** son sistemas de riego donde la dotación original cubre la demanda. En estos casos, la modernización no incrementa la superficie regada, por lo tanto, los ahorros obtenidos pueden traducirse en una reducción de las concesiones, sin cambios relevantes en el consumo unitario.
- **Sistemas con dotaciones excedentarias:** abarca zonas con disponibilidad superior a la demanda y elevado potencial de ahorro. En ausencia de mecanismos de control, los ahorros pueden destinarse a nuevas habilitaciones, generando un aumento del consumo hídrico a escala de cuenca.

Estos escenarios evidencian que la modernización de regadíos no garantiza, por sí sola, una reducción del uso del agua a nivel de cuenca. Por el contrario, en determinados contextos, las mejoras de eficiencia pueden inducir un aumento del consumo total. En consecuencia, la evidencia sugiere que las estrategias de modernización deben complementarse con instrumentos regulatorios y de gestión que permitan controlar el uso del recurso.

31 Ver CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SEQUÍA del Capítulo 1: GESTIÓN DE LA SEQUÍA: ÍNDICES CLIMÁTICOS.

En Mendoza, la modernización de regadíos se ha desarrollado en un contexto de escasez y déficit hídrico, con una fuerte regulación institucional, teniendo como efecto principal la consolidación de las áreas cultivadas.

Las mejoras en eficiencia han permitido estabilizar sistemas con déficits persistentes, mejorar la confiabilidad de la distribución y diversificar la producción en zonas previamente subabastecidas.

Sin embargo, la experiencia provincial demuestra que la modernización no ha implicado una reducción automática del consumo total a escala de cuenca, sino que ha contribuido principalmente a disminuir déficits estructurales y, en ciertos casos, a acompañar procesos de expansión de otras demandas, como el caso consumo poblacional en la cuenca del río Mendoza.

10.3.4 Organización institucional y asignación del recurso hídrico

10.3.4.1 Marco político e institucional actual

La política hídrica de la provincia de Mendoza se encuentra fuertemente institucionalizada y tiene su fundamento directo en la Constitución Provincial. La gestión ordinaria del agua se encuentra dotada de independencia constitucional.

El rasgo distintivo del sistema es la existencia de una doble autarquía institucional. Por un lado, el Departamento General de Irrigación (DGI), órgano creado como ente autárquico con competencia exclusiva en materia hídrica; por otro lado, las Inspecciones de Cauce, constituidas como comunidades de usuarios con autonomía respecto del propio DGI.

Este esquema no implica ausencia de control, sino una distribución de competencias de tipo operativas donde cada nivel ejerce funciones diferenciadas dentro de un mismo sistema.

10.3.4.1.1 El Departamento General de Irrigación

El Departamento General de Irrigación es el órgano constitucional encargado de la administración del recurso hídrico en la provincia. El artículo 188 de la Constitución Provincial de 1916 le otorga competencia exclusiva en todos los asuntos referidos a la irrigación. Asimismo, la propia Constitución regula el régimen de designación de sus autoridades y garantiza su inamovilidad mientras dure su buen desempeño, reforzando su independencia técnico-política. En concordancia con esta autonomía, el artículo 196 le reconoce potestades tributarias, permitiéndole establecer su propio presupuesto.

Desde el punto de vista organizativo, el DGI se estructura en tres órganos con competencias diferenciadas: la Superintendencia General de Irrigación, el Honorable Tribunal Administrativo y el Honorable Consejo de Apelaciones.

La Superintendencia constituye la máxima autoridad ejecutiva, de la cual dependen los Subdelegados de Aguas responsables de la administración de cada cuenca.

En materia de distribución, el DGI administra la red primaria de cauces públicos, ejerce la policía general de las aguas, resuelve sobre servidumbres, autoriza tomas y obras hídricas, analiza la viabilidad técnica de concesiones, controla la calidad de vertidos y supervisa a las autoridades que gestionan los cauces menores.

10.3.4.1.2 Las Inspecciones de Cauce

Las Inspecciones de Cauce representan el menor nivel descentralizado y participativo del sistema. Son estructuras organizadas por los propios usuarios, quienes eligen democráticamente a sus autoridades y administran sus recursos económicos mediante Asambleas de Usuarios. Este principio garantiza a los interesados la facultad de elegir sus autoridades y administrar sus respectivas rentas, sin perjuicio del control de las autoridades superiores.

Sus funciones se agrupan en tres grandes categorías:

- **Técnicas:** administrar y distribuir el agua en la red secundaria y terciaria, organizar el mantenimiento de canales y drenes, ejecutar obras necesarias, controlar el funcionamiento del sistema.
- **Jurisdiccionales**: actuar como juez de canal e hijuela en conflictos por el uso del agua, suspender la entrega en casos previstos por la ley.
- **Administrativas**: proyectar presupuestos, llevar registros, contratar personal y ejecutar directrices dispuestas por el DGI.

Las Inspecciones ejercen poder de policía en los cauces bajo su jurisdicción y asignan a cada derecho los volúmenes concedidos, constituyéndose en primera instancia ante conflictos legales vinculados a los derechos de aprovechamiento.

10.3.4.1.3 Asociaciones de Inspecciones de Cauce

A partir de 1993 se impulsó un proceso de descentralización administrativa mediante la creación de las Asociaciones de Inspecciones de Cauce (AIC). Estas entidades de segundo grado, conformadas voluntariamente por varias Inspecciones, tienen como objetivo coordinar tareas que de manera aislada resultarían difíciles de ejecutar.

Su finalidad es optimizar recursos, brindar asistencia técnica y fortalecer la administración zonal bajo principios subsidiarios.

Es importante destacar que las Asociaciones no constituyen una nueva autoridad administrativa ni sustituyen a las Inspecciones. Funcionan como estructuras de apoyo técnico, jurídico, contable y administrativo que facilitan la gestión, sin alterar la autonomía de cada Inspección.

10.3.4.2 Asignación y distribución de agua en la legislación hídrica

El régimen jurídico de la asignación y distribución del agua de riego en Mendoza se estructura a partir de la Ley de Aguas de 1884 y su posterior consolidación constitucional en 1916. Esta normativa establece los principios de dominio del recurso, el derecho de aprovechamiento, las categorías de uso, la distinción entre permisos y concesiones y los criterios de distribución.

Para riego, la asignación se determina por superficie:

Art. 122: "En toda nueva concesión de aprovechamiento de aguas públicas, se determinará la cantidad que corresponda como máximum, si es para riego, a razón de uno y medio litros por segundo para cada hectárea de terreno". (LA 1884)

Ante escasez extraordinaria:

Art. 162: "Siempre que en épocas de escasez extraordinaria el agua de un arroyo o de un río y sus afluentes sujetos a creces periódicas no alcance para la dotación permanente a razón de un litro por segundo para cada hectárea de terreno de regadío, se establecerá el aprovechamiento por turno entre todos los interesados que rieguen por el arroyo, el río o sus afluentes, mientras dura la escasez."

Aunque concebido como excepcional, el régimen de turnos se ha convertido en la modalidad habitual ante la reducción estructural de la oferta hídrica superficial.

La normativa fue complementándose con leyes y resoluciones, que ajustaron criterios de coeficientes de entrega, superficie computable, control hidrométrico y transparencia en la programación de turnos.

El marco normativo mendocino combina dominio público, inherencia del agua a la tierra, jerarquía de usos y asignación proporcional por hectárea, con distribución mediante turnos en función de la disponibilidad.

10.3.5 Gestión de la distribución

La gestión de la distribución constituye el núcleo operativo del sistema de riego, ya que define cómo el agua llega a cada usuario en tiempo y forma. Desde el punto de vista

técnico, los esquemas de distribución pueden clasificarse en dos grandes modalidades: entrega a la demanda y de distribución programada, cada una de ellas con variantes según el tipo de infraestructura utilizada.

10.3.5.1 Entregas a la demanda

En los sistemas de distribución a la demanda, los usuarios pueden acceder al agua en cualquier momento, lo que exige que la infraestructura se adapte automáticamente a necesidades variables e impredecibles. Este modelo es habitual en redes de agua potable urbanas, donde el consumo es continuo, pero individualmente incierto (se generan fluctuaciones). En riego, estos sistemas ofrecen un alto grado de flexibilidad, aunque requieren infraestructura con adecuada capacidad de regulación para garantizar la disponibilidad continua del recurso.

Según su infraestructura, pueden distinguirse dos tipos:

10.3.5.1.1 Sistemas presurizados a la demanda

Estos sistemas transportan el agua mediante tuberías a presiones superiores a la atmosférica, permitiendo una entrega controlada, con presiones que (normalmente) permiten tecnificar la aplicación del riego en las propiedades. La infraestructura incluye reservorios de regulación, elementos de presurización (cuando no se aprovecha un desnivel natural), válvulas, tomas y caudalímetros.

Su principal ventaja es la flexibilidad operativa, ya que permiten al usuario disponer del recurso cuando lo requiere. Sin embargo, su costo de inversión puede ser elevado, especialmente si se busca garantizar una disponibilidad irrestricta. Por esta razón, pueden existir restricciones en períodos de máxima demanda (como turnos de riego o límites en la superficie regada simultáneamente) a fin de gestionar la capacidad hidráulica de la red y evitar sobrecargas.

La diversificación de cultivos también incide en su funcionamiento, ya que la existencia de diferentes calendarios de riego reduce los picos de demanda.

10.3.5.1.2 Sistemas a la demanda a lámina libre

En estos casos, la distribución se realiza mediante canales abiertos, buscando ofrecer prestaciones similares a los sistemas presurizados pero con menores costos energéticos y aprovechando la infraestructura de distribución existente.

Para operar efectivamente a la demanda se requiere una gestión avanzada que optimice la distribución a través de pedidos de riego, o bien que la oferta supere ampliamente a la demanda. La infraestructura comprende estructuras de control de niveles y caudales (como compuertas y vertederos) capaces de ajustar automáticamente el flujo en función de la demanda.

La automatización (ya sea mecánica, hidráulica o electromecánica) constituye un componente clave para sostener la flexibilidad operativa del sistema. En redes de baja pendiente, los propios canales pueden actuar como reservorios temporales, permitiendo amortiguar las variaciones en la demanda. Sin embargo, en ausencia de una gestión adecuada, pueden producirse pérdidas significativas, tales como derrames en cola de red o caudales no contabilizados.

Estos esquemas pueden requerir importantes volúmenes de almacenamiento para garantizar su funcionamiento, lo que incrementa de manera considerable los costos tanto de construcción como de operación. En este contexto, la incorporación de tecnologías de monitoreo y control resulta indispensable para optimizar el desempeño del sistema y reducir ineficiencias.

10.3.5.2 Distribución programada

En los sistemas de distribución programada, la entrega se organiza mediante turnos preestablecidos, definidos por la autoridad competente, con una mayor o menor participación de los usuarios. En este esquema, la administración conoce en todo momento quién utiliza el recurso, qué cantidad recibe y quién será el siguiente usuario en utilizarlo, lo que permite un mayor control operativo, redes con menor inversión, relativo a los sistemas a la demanda, aunque con menor flexibilidad.

Al igual que en el caso anterior, pueden distinguirse dos variantes:

10.3.5.2.1 Sistemas programados presurizados

Si bien muchas redes presurizadas se conciben para operar en un sistema a la demanda (o con una cierta independencia), pueden adaptarse fácilmente a un régimen programado cuando las condiciones lo requieren. Esta modalidad puede implementarse para reducir costos operativos, limitar inversiones, enfrentar situaciones de sequía severa o ejercer un control estricto sobre los volúmenes entregados.

La programación de turnos permite optimizar el uso de la red sin comprometer su integridad hidráulica y resulta particularmente útil cuando existen restricciones en la disponibilidad del recurso o expansiones no planificadas de la demanda total.

10.3.5.2.2 Sistemas programados a canal abierto

Este es el modelo más extendido en la provincia de Mendoza. Se basa en una red de canales abiertos donde la entrega se realiza conforme a Cuadros de turno preestablecidos por la autoridad administradora.

En este esquema, la flexibilidad del sistema depende directamente de la capacidad de la infraestructura para adaptarse a modificaciones en la programación. Elementos como embalses en cabecera, reservorios intermedios, compuertas de seccionamiento, estructuras de control de niveles y caudales, y sistemas de medición resultan fundamentales para incrementar la flexibilidad operativa y asegurar que la programación se cumpla efectivamente.

Asimismo, un sistema ágil de confección de turnos que contemple las demandas puntuales de los usuarios, acompañado de una normativa actualizada y de una cuenta de agua por concesión, mejora la eficiencia y la oportunidad en la entrega. En ausencia de estos instrumentos, la distribución tiende a rigidizarse, reduciendo incentivos para minimizar ineficiencias, especialmente en términos de equidad y oportunidad del riego.

10.4 ESTADO DE SITUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN HÍDRICA Y EL IMPACTO DE LA SEQUÍA

10.4.1 Contexto hidrológico: la sequía[32]

Existen un gran número de definiciones de "sequía", dependiendo de las características funcionales de los organismos que las definen.

Según la Real Academia Española, la sequía se define como un "tiempo seco de larga duración", definición que contiene al menos tres dimensiones fundamentales: se trata de un fenómeno climatológico, implica una disponibilidad de agua inferior a la requerida y posee una duración suficiente como para generar anomalías detectables con impactos ambientales, sociales y económicos, siempre dentro de un espacio geográfico determinado.

No obstante, aunque esta definición inicial alude a la persistencia del fenómeno, su precisión conceptual exige considerar variables hidrometeorológicas específicas, factores socioeconómicos y la naturaleza estacional de las demandas, aspectos que complejizan su delimitación.

Desde una perspectiva vinculada a la escasez hídrica, la sequía puede entenderse como una anomalía transitoria caracterizada por la disminución temporal de la cantidad de agua respecto de los parámetros medios, o históricos, durante un período prolongado.

32 Ver el Capítulo 1: GESTIÓN DE LA SEQUÍA: ÍNDICES CLIMÁTICOS.

En cambio, cuando se la relaciona con el déficit hídrico, la sequía se define como aquella situación en la que la insuficiencia de recursos disponibles es tal que provoca daños o perjuicios (en mayor o menor grado) a los cultivos, los animales o las actividades humanas. En este último sentido, la sequía involucra consecuencias económicas y sociales derivadas de la incapacidad del sistema para satisfacer las demandas existentes.

10.4.2 Sequías en Mendoza

Entre 2010 y 2023, la provincia de Mendoza registró una marcada disminución de los derrames en sus ríos, generando un período de sequía prolongada que afectó a todas sus cuencas. En ese lapso no se verificaron años consecutivos con derrames clasificados como "normales" o "húmedos" en todos sus ríos. Los años comprendidos entre 2015 y 2017 presentaron una situación relativamente más heterogénea, con derrames que oscilaron entre pobres y normales y episodios de sequía de intensidad moderada; en contraste, el resto del período se caracterizó predominantemente por condiciones de sequía moderada, severa o extrema.

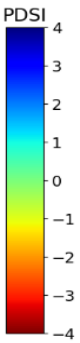
Para contextualizar la magnitud y excepcionalidad de este episodio reciente, resulta útil analizar las sequías históricas. La caracterización de los períodos de sequía a escala regional se apoya en el Atlas de Sequías de Sudamérica (SADA), que reconstruye la variabilidad hidroclimática desde el año 1400.

Dicho análisis se fundamenta en estudios dendrocronológicos, a partir de los anillos de crecimiento de árboles, que permiten reconstruir la disponibilidad hídrica histórica en Sudamérica para el período 1400-2000. La variable principal empleada es el Índice de Severidad de Sequía de Palmer auto-calibrado (scPDSI), un indicador ampliamente utilizado para evaluar la disponibilidad de agua en el suelo (Cuadro 10.1).

Cuadro 10.1 **Escala del índice de Palmer**

Escala del Indice de Sequía de Palmer (PDSI)

4 o más:	Extremadamente húmedo
3.0 a 3.9:	Muy húmedo
2.0 a 2.9:	Moderadamente Húmedo
1.0 a 1.9:	Ligeramente húmedo
0.5 a 0.9:	Incipientemente húmedo
-0.49 a 0.49:	Normal
-0.9 a -0.5:	Sequía incipiente
-1.9 a -1.0:	Sequía suave
-2.9 a -2.0:	Sequía moderada
-3.9 a -3.0:	Sequía severa
-4 o menos:	Sequía extrema



El Cuadro 10.2 sintetiza la evolución de las condiciones hidroclimáticos en el territorio que hoy conforma la provincia de Mendoza a lo largo de los últimos seis siglos, permitiendo identificar fases de disponibilidad de humedad y ocurrencia de sequías.

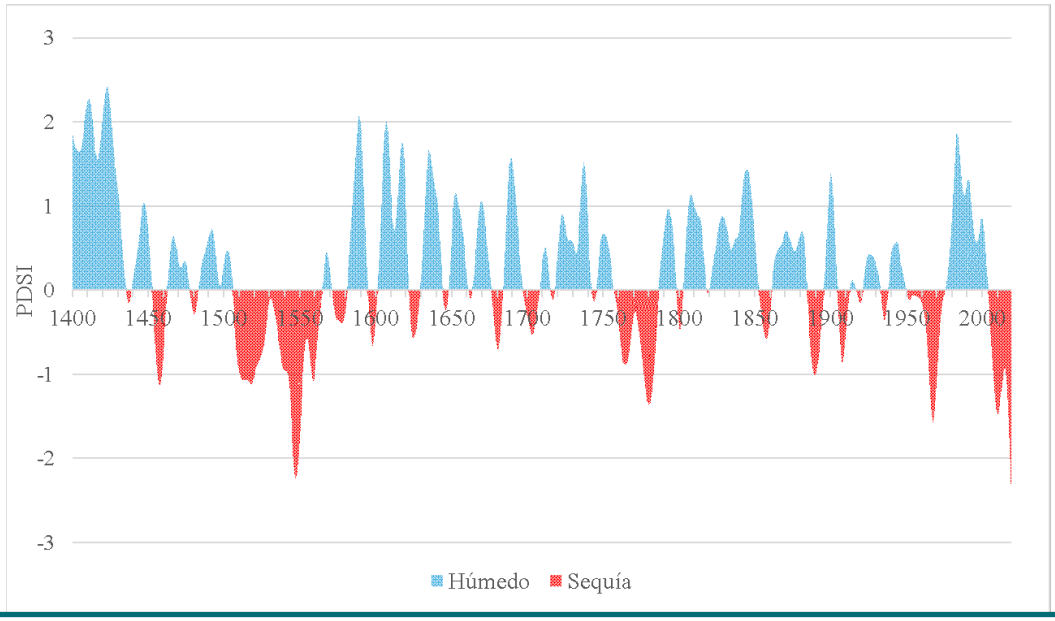
Durante el siglo XV predominan condiciones relativamente húmedas. Sin embargo, en el siglo XVI se produce un cambio del régimen climático, caracterizado por períodos secos intensos y prolongados que se extienden hasta comienzos del siglo XVII. Los mínimos del índice de sequía registrados en ese intervalo solo vuelven a observarse e incluso a ser superados, recién en las décadas del 2010 al 2020 del siglo XXI.

Entre fines del siglo XVI y mediados del siglo XVIII se observa un periodo húmedo, interrumpido únicamente por episodios secos de corta duración y baja severidad relativa. Este ciclo es sucedido por una sequía significativa, tanto por su intensidad como por su persistencia, que se desarrolla aproximadamente entre 1760 y 1790.

Posteriormente, desde fines del siglo XVIII y a lo largo de gran parte del siglo XIX, se registra un nuevo período de alta disponibilidad hídrica, con la sola excepción de algunos años secos aislados hacia mediados del siglo y en la última década del siglo XIX.

El último periodo seco del siglo XIX coincidió con una etapa de gran transformación en la administración de las aguas en Mendoza. Durante esta época, la expansión del modelo vitivinícola y la implementación de la ley de aguas de 1884, que establecía cupos de agua por superficie, facilitaron un rápido crecimiento de cultivos como la vid y los frutales. Sin embargo, esta transformación también provocó conflictos relacionados con la asignación del recurso hídrico, especialmente en los sectores más distales de los oasis irrigados.

Cuadro 10.2 **Índice de Sequía PDSI (suavizado) Provincia de Mendoza. Período 1400 a 2020**



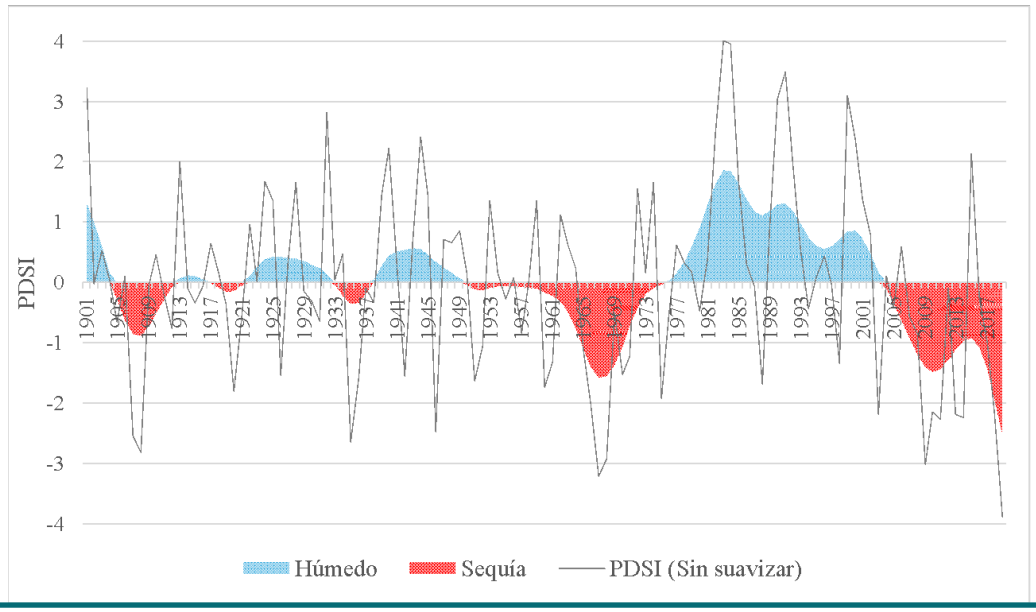
El siglo XX se inició con una fase relativamente húmeda, que fue rápidamente interrumpida por una sucesión de años secos entre 1905 y 1911, identificables en los valores negativos del PDSI (Cuadro 10.3). Este período coincidió con una etapa de expansión del modelo agroindustrial vitivinícola y con una política de otorgamiento de derechos de riego que incrementó la presión sobre los recursos hídricos superficiales.

La gran sequía de 1923-1925 constituye uno de los eventos más críticos del siglo. El PDSI, sin suavizar (línea gris clara del Cuadro10.3) muestra valores negativos durante este período, en concordancia con registros hidrológicos que evidencian valores por debajo de la media en los ríos. Prieto et al. documenta que este evento tuvo una duración de entre 25 y 30 meses según la cuenca, alcanzando categorías de sequía severa a extrema en algunos tramos (Prieto et al).

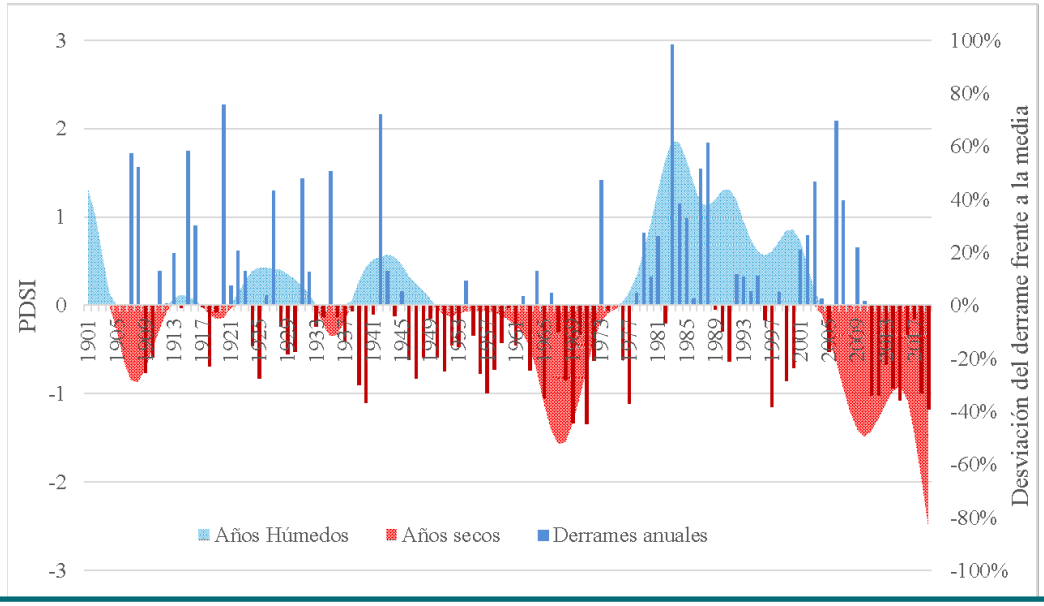
Desde el punto de vista socioeconómico, esta sequía generó pérdidas de cosechas, escasez de agua potable, conflictos entre regantes y protestas urbanas, conCuadrondo un escenario en el cual la escasez fue interpretada mayormente como resultado de fallas en la gestión y decisiones políticas, más que como un fenómeno estrictamente meteorológico. De hecho, casi el 40 % de las referencias periodísticas del período atribuyen la carencia a acciones humanas y a la responsabilidad del gobierno provincial, mientras que las causas climáticas aparecen en segundo plano (Prieto et al).

Tras décadas de alternancia entre condiciones húmedas y secas moderadas, un nuevo ciclo crítico se manifestó a mediados y fines de la década de 1960, particularmente en 1967-1969. Este evento aparece claramente reflejado en el PDSI con valores negativos persistentes (Cuadro 10.3) y se corresponde con fuertes anomalías negativas en los derrames anuales de los ríos mendocinos (Cuadro 10.4).

Cuadro 10.3 **Índice de Sequía PDSI. Provincia de Mendoza. Período 1901 a 2020**



Cuadro 10.4 Índice de sequía de Palmer y desviación de los derrames de los ríos de Mendoza



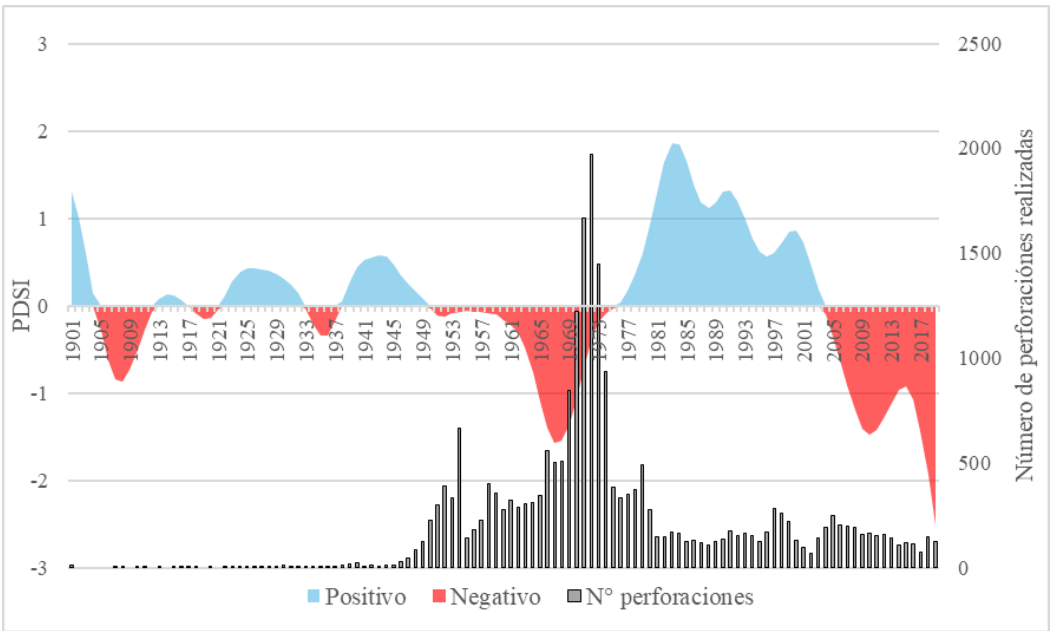
Prieto et al. destacan que 1968 fue el año de menor acumulación nival en la cordillera desde al menos 1951, lo que derivó en una sequía hidrológica extrema con impactos tanto sobre el riego agrícola, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento urbano A diferencia de la crisis de los años 1920, en este período la explicación dominante de la escasez se apoyó con mayor énfasis en causas meteorológicas, en un contexto de fuerte crecimiento urbano, expansión del sector servicios y consolidación de nuevos usos del agua, como la explotación de hidrocarburos y la energía.

Un rasgo distintivo de la segunda mitad del siglo XX es la creciente utilización del agua subterránea como estrategia para compensar déficits de la oferta superficial. Como se observa en el Cuadro 10.5, la cantidad de perforaciones muestra un elevado crecimiento a partir de fines de la década de 1960, coincidiendo con el período de sequía y con políticas públicas orientadas al aumento de la oferta hídrica mediante subsidios, créditos y desgravaciones impositivas.

Este proceso, que Prieto et al. interpretan como una respuesta típica de la gestión hídrica mendocina basada en la expansión de la oferta, permitió sostener el crecimiento productivo en el corto y mediano plazo, pero introdujo nuevas vulnerabilidades estructurales, asociadas a la sobreexplotación de acuíferos y a la dependencia de fuentes no renovables en escalas temporales humanas.

A comienzos del siglo XXI, la provincia de Mendoza ingresa en un nuevo período seco que, a diferencia de eventos anteriores, se caracteriza por su persistencia temporal y profundización de los valores negativos del índice de sequía. Prieto et al. señalan que las sequías recientes deben ser analizadas en un contexto de creciente complejidad social,

Cuadro 10.5 **Índice de sequía de Palmer a lo largo del siglo XX y cantidad de perforaciones realizadas por año.**



productiva e institucional, donde los déficits hidroclimáticos interactúan con transformaciones estructurales en los usos del agua y en los mecanismos de gestión.

A partir de 2010 se evidencia una fase predominantemente negativa, con valores comparables a los mínimos registrados durante la sequía de fines de la década de 1960 y una posterior profundización hacia finales de la década de 2010, alcanzando mínimos absolutos hacia 2019. Prieto et al. identifican este período como una de las principales sequías del último siglo, destacando su carácter prolongado y su asociación con una sucesión de inviernos con baja acumulación nival en la cordillera, lo que repercutió directamente en los caudales de los ríos de la región.

Este evento se desarrolló en dos etapas claramente diferenciadas. La primera, entre 2010 y 2015, estuvo asociada a déficits persistentes de nieve en la cordillera y a una reducción sostenida de los derrames. La segunda fase de sequía se consolidó a partir de 2017, culminando en condiciones de sequía severa a extrema. Prieto et al. destacan que esta secuencia de eventos no puede interpretarse como un episodio aislado, sino como parte de una serie prolongada de déficits hidrológicos, cuya recurrencia incrementa la vulnerabilidad del sistema hídrico provincial.

La disminución de los derrames afectó simultáneamente a las principales cuencas de la provincia, comprometiendo, fundamentalmente, la disponibilidad para riego y generación hidroeléctrica y en menor medida el abastecimiento urbano, e industria. Según Prieto et al., a diferencia de las sequías de principios y mediados del siglo XX, estos eventos recientes ocurren en un contexto de demanda estructuralmente elevada,

con una población mayoritariamente urbana y una diversificación creciente de los usos del agua, lo que amplifica los impactos de los déficits naturales.

Asimismo, el trabajo señala que la capacidad de respuesta basada en el incremento de la oferta, particularmente mediante la explotación de aguas subterráneas, fue una estrategia característica de las sequías de mediados del siglo XX, pero en el siglo XXI, esta estrategia encuentra límites más evidentes, tanto por las restricciones hidrogeológicas como por el reconocimiento de los impactos acumulados sobre los acuíferos lo que reduce los márgenes de adaptación disponibles

Frente a la persistencia del déficit, la respuesta institucional se orientó principalmente hacia mecanismos de gestión, incluyendo ajustes en la distribución y fortalecimiento de instrumentos normativos, la respuesta de los usuarios agrícolas fue la del aumento en la eficiencia de riego intraparcelario mediante el uso de riegos tecnificados y optimización del riego tradicional. Prieto et al. subrayan que muchas de estas medidas se desplegaron de manera reactiva y en contextos de urgencia, y que varios de los dispositivos regulatorios implementados durante las crisis tienden a perdurar más allá del evento climático que los originó, transformándose en nuevas condiciones estructurales del sistema hídrico.

Esta trayectoria histórica permite contextualizar la magnitud y los efectos de la sequía iniciada a comienzos del siglo XXI. El análisis del índice de sequía muestra que este evento alcanza valores excepcionalmente bajos en el registro instrumental, mientras que su impacto se ve amplificado por un sistema hídrico que llega al siglo XXI con elevados niveles de exigencia y escasos márgenes de maniobra. En este marco, los déficits climáticos interactúan con una estructura de usos consolidada y con mecanismos de gestión desarrollados para escenarios de mayor disponibilidad, lo que contribuye a explicar la profundidad de la crisis y la necesidad de implementar respuestas extraordinarias.

10.4.3 Medidas adoptadas en Mendoza en la sequía de 2010 a 2023.

Durante la sequía iniciada en la década de 2010, la provincia de Mendoza adoptó un conjunto amplio y progresivo de medidas orientadas a sostener el funcionamiento del sistema hídrico frente a una disminución de la oferta.

Los Balances Hídricos de cuenca elaborados entre 2012 y 2015 ya habían incorporado la sequía como un escenario posible a futuro, enmarcándola en un contexto de variabilidad climática y cambio climático, y considerando la reducción de la oferta como un proceso gradual[33].

33 Ver el Capítulo 3: DIGITALIZACIÓN Y DATOS ABIERTOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ESCENARIO DE CRISIS CLIMÁTICA.

Estos documentos adoptaron los lineamientos de organismos internacionales, anticipando una disminución de los caudales, un aumento en la frecuencia e intensidad de sequías:

"Los escenarios de cambio climático para la mayoría de las tierras secas del mundo anticipan variaciones en los patrones de temperatura y precipitaciones, disminución de los caudales de los ríos y una mayor frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos tales como la sequía. Si bien en estos territorios los déficits hídricos son estructurales, los escenarios de cambio climático permiten anticipar un endurecimiento de las condiciones naturales de aridez y un incremento en la frecuencia e intensidad de los conflictos de agua. Esto afectaría diferentemente a los territorios irrigados y a los no irrigados, a los urbanos y a los rurales, a los diferentes sistemas productivos y, finalmente, a los diversos actores en ellos involucrados.

Algunos estudios señalan que los aumentos de las temperaturas serán mayores en las regiones más elevadas respecto de nivel del mar, lo que implicaría que una proporción menor de las precipitaciones en la alta montaña serían níveas (respecto de las lluvias) y que existiría una fuerte presión en los procesos de fusión de los hielos que se materializa en la progresiva retracción de los glaciares. De hecho, se ha estimado una elevación de 150 metros de la posición de la isoterma 0° C, lo que produciría una disminución de la superficie de acumulación de nieve en el invierno y un aumento de la superficie de ablación. En las zonas planas se debe considerar la incidencia de las mayores temperaturas, lo que incrementaría la evapotranspiración de los cultivos que eleva las demandas de agua." (DGI, 2015).

A partir de 2015, las condiciones de sequía se intensificaron y se tornaron prácticamente persistentes. Con la excepción del año hidrológico 2016/17, los años con condiciones normales o húmedas prácticamente desaparecieron, predominando escenarios de sequía moderada a severa. Hacia 2020 la situación se agravó notablemente, alcanzando condiciones de sequía severa y extrema en casi todas las cuencas provinciales. **Entre 2010 y 2022, con un énfasis particular en el período de 2017 a 2022, se registró una situación altamente disruptiva en la oferta hídrica. Esta fue más grave que el escenario más desfavorable contemplado en los balances hídricos presentados en 2015.**

El pronóstico de escurrimientos para el año 2017/18, que preveía una fuerte disminución en los caudales de los ríos, motivó la publicación de la resolución 1410 del año 2017. La misma establece una serie de medidas tendientes a mitigar el efecto de la sequía. Las mismas se trascriben a continuación:

1. Encomiéndesele a los Subdelegados de Aguas y Jefatura de Zona, conjuntamente con las Inspecciones de Cauce, adoptar las medidas necesarias para una correcta y eficiente distribución del recurso hídrico, teniendo en cuenta los caudales reales disponibles y los criterios de distribución fijados por la Ley de Aguas para época de escasez hídrica, de conformidad con lo prescripto por el art. 162 ss y cc.; como así también las prioridades legales en cuanto a categoría de derechos y usos, dispuesto en el mismo cuerpo normativo.

2. Las Inspecciones de Cauce, con la asistencia técnica de las Subdelegaciones, deberán implementar programas de mejoramiento de la asignación y distribución del agua utilizando el criterio de entregar el agua necesaria en función de la superficie efectivamente cultivada no incluyendo propiedades abandonadas, aunque las misma se encuentren al día en el pago de sus tributos.

3. A medida que se pongan en funcionamiento reservorios de agua en la margen del quinto y sexto tramo del Canal San Martín del Río Mendoza, procédase paulatinamente a ajustar la forma de distribuir el agua, hasta implementar definitivamente sistemas Acordados.

4. A través de la Secretaría de Gestión Hídrica, instruméntense capacitaciones en riego y asesoramiento a las inspecciones de Cauce y a los regantes para mejorar la distribución de agua y las eficiencias de aplicación.

5. Procédase a intensificar las mediciones de eficiencia en las cuencas más críticas y a instrumentar recetas de riego parcelario (a fin de maximizar las eficiencias).

6. A través de la Áreas Técnicas pertinentes y en forma participativa con las Inspecciones de Cauce, deberá establecerse un programa erogaciones, control y supervisión del manejo de embalses, asegurando que la erogación se adecue a las necesidades de los derechos prioritarios empadronados. El de erogaciones deberá planificarse de manera tal que los usos no consuntivos, tales como generación hidroeléctrica, turismo, etc. se compatibilice con las necesidades de otros usos consuntivos prioritarios. Este programa será supervisado por la Secretaría de Gestión Hídrica y deberá actualizarse con las IC en función de los escurrimientos reales que se observen en cada Río.

7. Los esquemas de distribución a elaborarse por las Subdelegaciones y Jefatura de Zona, deberán contemplar la posibilidad de complementar o sustituir el suministro con otras fuentes alternativas.

8. A los fines dispuestos en el dispositivo anterior, invítese a los concesionarios o permisionarios del recurso hídrico subterráneo a poner a disposición de la Superintendencia las perforaciones que actualmente se encuentren en uso y que conforme su ubicación geográfica, sirvan para que, en forma parcial o total, se disponga del caudal que erogen a los fines de reforzar los caudales superficiales.

9. Sin perjuicio de lo dispuesto en el dispositivo anterior, Superintendencia procederá a identificar a aquellas perforaciones actualmente en uso o las que se construyan en el futuro que sean necesarias a los fines dispuestos anteriormente. En ambos casos, sean ofrecidos voluntariamente o por disposición de ésta Superintendencia, las perforaciones serán afectadas al régimen de "ocupación temporaria" por el tiempo que se fije o mientras subsista la Emergencia Hídrica. Los afectados que lo soliciten podrán optar entre la eximición de los cánones que deben abonarse por el uso de aguas subterráneas durante el periodo de afectación o recibirán la indemnización prevista en el art. 60 del Dec. Ley 1447 / 75 y que oportunamente

fije el Honorable Tribunal Administrativo. El monto indemnizatorio deberá ser reembolsado por los beneficiarios del uso complementario del agua subterránea en el plazo que oportunamente se fije.

10. Los Subdelegados podrán autorizar en forma provisoria, excepcional e inter dure la Emergencia Hídrica el uso de una misma perforación entre una o más propiedades linderas con derecho de uso especial de agua superficial, en forma individual o a través de la conformación de consorcios, conforme lo prescripto la Ley 4035. Las condiciones de uso y contraprestaciones económicas destinadas a solventar los gastos de funcionamiento de la perforación, deberán ser convenidas entre concesionario o permisionario y los restantes propietarios, acuerdo que deberá ser presentado para su homologación ante la Subdelegación respectiva.

11. Durante el período de Emergencia Hídrica suspéndase todo trámite correspondiente al otorgamiento de nuevos "Permisos Precarios o Temporarios", a excepción de aquellos destinados al abastecimiento poblacional o a satisfacer necesidades en donde se encuentre comprometido el interés público.

12. Las Subdelegaciones, Jefatura de Zona e Inspecciones de Cauce, deberán extremar los controles a los fines de evitar el "uso clandestino" del recurso hídrico, debiendo denunciar y sancionar, con el doble del monto de las multas que prevé la normativa vigente, a aquellos particulares que realicen un uso no autorizado o de cualquier manera entorpezcan o dificulten el normal escurrimiento del recurso hídrico.

13. En el marco de lo previsto por el art. 26 de la Ley de Aguas y a los fines de hacer efectiva la posibilidad de dotar temporalmente a una propiedad cultivada con el turno que corresponda a otra que se encuentre abandonada o que tenga menos requerimientos hídricos que los empadronados, siempre que ambas propiedades estén bajo el regadío del mismo canal, cuando las necesidades del cultivo lo requieran y fuere solicitado por el interesado, la Inspección de Cauce respectiva deberá tomar la debida intervención dando fehaciente notificación de esta circunstancias a los demás usuarios del canal y a la Subdelegación correspondiente.

14. Increméntese las medidas de prevención de la contaminación hídrica en los ríos provinciales, especialmente en áreas de alta vulnerabilidad.

15. Las áreas técnicas de las Subdelegaciones y Jefatura de Zona bajo la dirección de la Secretaría de Gestión Hídrica deberán implementar auditorías que permitan ajustar cualquier desviación, ajuste de pérdidas, volúmenes erogados, etc. todo ello en consideración a los volúmenes reales de los ríos de la Provincia.

16. Las áreas técnicas de cada Subdelegación deberán hacer uso continuo del software y hardware (Sistema MIDO) para la evaluación de la ejecución de la distribución del agua, así como el continuo mantenimiento de las estructuras de aforo, de calibración de sensores, y mantenimiento de la comunicación en tiempo real de los datos de caudales distribuidos.

17. Las medidas ordenadas en el presente resolutivo deberán ser aplicadas y complementadas con las disposiciones que los Sres. Subdelegados dispongan en cada una de sus cuencas, respetando las necesidades y realidad de cada una de ellas.

18. A través de los medios de difusión masiva, infórmese a los usuarios del recurso hídrico y comunidad mendocina en general, sobre la necesidad del extremo cuidado del recurso hídrico, y las medidas ordenadas en el presente resolutivo.

19. La Secretaría de Gestión Hídrica deberá evaluar la conveniencia de aplicar otros medios que se implementan en distintas regiones que sufren eventos de extrema escasez, a los fines de su implementación en la Provincia de Mendoza.

20. Regístrese. Notifíquese a las Subdelegaciones de Aguas y Zona de Riego y por intermedio de las mismas a las Inspecciones de Cause y publíquese por medio de diarios de mayor circulación y en el Sitio Web del Organismo. Cumplido pase a la Secretaría de Gestión Hídrica para su cumplimiento y demás efectos. Oportunamente remítase copia al Honorable Tribunal para su conocimiento.

La Resolución 1410 exhorta y reglamenta una serie de acciones que, en la medida que la crisis hídrica persistía en el tiempo, fueron tomando forma, llegando a establecer programas de entrega de agua concretos y consistentes.

En el año 2022, el DGI sistematizó un conjunto de medidas estructurales y estratégicas orientadas a fortalecer la capacidad del sistema hídrico provincial frente a escenarios de sequía persistente. Estas medidas consolidan aprendizajes del período 2010-2022 y buscan mejorar tanto el conocimiento del recurso como la eficiencia, flexibilidad y sostenibilidad de su gestión.

Un eje central fue el fortalecimiento de la gestión de la oferta hídrica, mediante la ampliación y robustecimiento del Sistema de Información Hidronivometeorológica (SIH) en cuanto a las hidromensuras en general (temperatura, radiación, EAN, aforos, comunicaciones, etc.). En paralelo, se intensificaron las campañas de monitoreo de aguas subterráneas, tanto en cantidad como en calidad, generando información clave para la delimitación de áreas con restricciones o prohibiciones para nuevas perforaciones.

En relación con la disponibilidad efectiva del recurso, las medidas combinaron inversiones en infraestructura, mejoras en la red de conducción y distribución, y optimización de la gestión. Se sostuvo una visión de largo plazo orientada a modernizar la red y el sistema de medición, mientras que en el plano operativo se avanzó en la digitalización y publicación de los Cuadros de turnos y la introducción de esquemas más flexibles.

Estos mecanismos permitieron ajustar la entrega de agua a la superficie efectivamente habilitada para regar, incentivar el ahorro en períodos de menor demanda y mejorar la oportunidad de uso del recurso mediante la participación activa de los usuarios. La implementación de la "cuenta de agua" por inspección constituyó una herramienta clave para contabilizar volúmenes entregados.

Otro componente relevante fue la medición de la eficiencia de riego intrafinca, orientada tanto a la generación de información como a la asistencia técnica a los productores. Los relevamientos realizados entre 2019 y 2020 mostraron una eficiencia media de aplicación cercana al 62 %, superior a los valores considerados en los balances hídricos de 2015, lo que permitió actualizar supuestos. Complementariamente, se pusieron a disposición plataformas públicas para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos por zona, facilitando el ajuste entre la oferta disponible y la demanda de los cultivos.

La gestión del agua subterránea adquirió un carácter más restrictivo y precautorio. A partir del seguimiento sistemático de niveles y calidad, los acuíferos fueron clasificados según su disponibilidad y grado de restricción.

Las medidas estructurales se complementaron con acciones orientadas a la construcción de gobernanza, mediante el fortalecimiento del vínculo con organismos científico-técnicos, la elaboración del Plan Maestro para el Sector Hídrico y la promoción de iniciativas legislativas destinadas a incentivar prácticas de riego más eficientes y un uso más racional del recurso.

En conjunto, las medidas estructurales adoptadas a partir de 2022 reflejan un cambio de enfoque hacia una gestión más integrada, basada en información, eficiencia y flexibilidad, orientada a sostener el sistema hídrico provincial.

10.5 ADAPTABILIDAD EN LA GESTIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN

10.5.1 Introducción

Si se analiza la operación de la distribución, en sus niveles primario y secundario, se evidencias metodologías orientadas a mejorar la gestión del recurso en relación con la infraestructura disponible. Se desarrolla un modelo de gestión aplicable tanto en condiciones hidrológicas normales como en escenarios de sequía, el cual está actualmente aplicándose con diferentes matices.

La captación y conducción del agua desde los ríos hasta los canales principales es responsabilidad del Departamento General de Irrigación, a través de sus Subdelegaciones, mientras que la distribución secundaria es gestionada por las Inspecciones de Cauce, integradas por los propios usuarios. **Esta organización institucional es fundamental para comprender los mecanismos de asignación del recurso.**

Los esquemas de distribución adoptados en cada cuenca y sistema de riego responden a criterios que han evolucionado con el tiempo, con el objetivo de garantizar la equidad y el uso racional del agua. La clasificación de estos métodos permite analizar los distintos modelos de gestión existentes y evaluar alternativas para su aplicación en contextos de escasez.

10.5.2 Principios y organización de la distribución del agua

La distribución del agua a los usuarios finales, a cargo de las Inspecciones de Cauce, se organiza sobre un conjunto de principios básicos que orientan la gestión del recurso.

El principio de equidad establece que todas las concesiones deben recibir, a lo largo de la campaña o temporada de riego, el mismo volumen o lámina por hectárea, de modo que el total asignado al finalizar el período sea igual para los usuarios que cumplan con ciertos requisitos.

La confiabilidad se sustenta en la transparencia de las operaciones y en la medición de los caudales derivados, de manera que los usuarios conozcan las condiciones de entrega.

La uniformidad busca garantizar no solo la igualdad en los volúmenes, sino también en las condiciones de entrega, evitando sesgos sistemáticos en horarios de entrega, compensando pérdidas y tiempos de recorrido dentro del sistema y asignando caudales que permitan riegos eficientes.

Finalmente, la flexibilidad permite adaptar y ajustar la distribución frente a inconvenientes operativos o cambios en la demanda, dentro de las posibilidades que ofrece la infraestructura disponible.

La red de distribución de agua en Mendoza se organiza de forma jerárquica, desde canales primarios hasta hijuelas y tomas que abastecen directamente a los regantes. Para una gestión eficiente del sistema es fundamental la codificación de todos los elementos de la red (canales, derivaciones, aforadores, tomas, reservorios, pozos), permitiendo identificar su posición jerárquica y facilitar la integración, control y planificación de la distribución. En general, la codificación alcanza hasta el nivel de hijuela, aunque en ciertos casos se reconocen niveles adicionales o tomas directas desde ríos y canales principales.

La hijuela, se identifica como un cauce donde los regantes comparten el caudal entre ellos, siendo en definitiva la unidad de gestión de los turnos (fraccionamiento de la entrega de dotación). En algunos casos el concepto de hijuela excede al de un cauce determinado, siendo un conjunto de regantes que comparten un mismo caudal, pero se encuentran en lugares diferentes del canal, como por ejemplo un conjunto de tomas directas del canal.

Como se describió anteriormente, las metodologías de entrega de agua se clasifican según distintos criterios (comportamiento hidráulico, dependencia de derivaciones, planificación e información disponible), distinguiéndose principalmente entre sistemas a demanda y sistemas programados (turnados).

En Mendoza, el sistema turnado es el predominante en la distribución secundaria, bajo la administración de las Inspecciones de Cauce, mientras que la distribución primaria opera mediante esquemas programados adaptados a cada cuenca y teniendo en cuenta las demandas de cada canal. Se propone avanzar hacia sistemas programados con mayor control sobre los volúmenes entregados en la distribución primaria y hacia entregas programadas más flexibles en la secundaria, incorporando pedidos de riego y estructuras de regulación, de acuerdo con los requerimientos variables de cada tipo de demanda.

10.5.3 Relación entre turnado convencional y la eficiencia de uso del agua

La ineficiencia de riego con métodos gravitacionales se explica, en gran medida, por el desacople que puede producirse entre la gestión de los turnos en la red de distribución y las decisiones que adopta el usuario al aplicar el agua dentro de su predio.

En extensas zonas de riego, parte de las ineficiencias observadas se originan cuando los cambios en la frecuencia o en la organización de los turnos, no son acompañados por una adaptación en la forma de riego. El objetivo de este análisis es aportar elementos conceptuales que permitan comprender esta relación y sirvan como base para estudios posteriores, manteniendo constantes otras variables para simplificar el análisis.

Desde el punto de vista físico, el comportamiento del sistema está condicionado por la capacidad del suelo para almacenar agua. La capacidad de campo representa el contenido máximo de agua que el suelo puede retener luego de un riego, mientras que la humedad aprovechable se encuentra delimitada entre ese valor y el punto de marchitez permanente. El rango óptimo de humedad para el crecimiento de los cultivos se ubica entre la capacidad de campo y el umbral de riego; descender por debajo de este último implica una afectación de la producción debido al esfuerzo adicional que debe realizar la planta para extraer el agua del suelo.

La eficiencia de aplicación se define como la relación entre la lámina media infiltrada y almacenada en el suelo y la lámina media aplicada durante el riego. Cuando se considera que la lámina infiltrada coincide con la lámina de reposición, se obtiene la eficiencia potencial de aplicación, que supone un diseño adecuado del sistema y un manejo óptimo del agua, sin incorporar los efectos de la uniformidad. Para el análisis se evalúa cómo varía esta eficiencia potencial en función del tiempo o intervalo entre riegos, los cuales están condicionados tanto por la gestión de la red como por la decisión del productor de regar una fracción del predio en cada turno.

Cuando el agua es escasa, la red de distribución se organiza en turnos con el objetivo de asegurar caudales que permitan una distribución lógica y eficaz; y un riego adecuado. Como consecuencia, los intervalos entre riegos se extienden a medida que disminuye la oferta hídrica. Esta lógica, que se aplica a nivel de la red, también se reproduce dentro de los predios, donde es habitual que no se riegue la totalidad de la superficie del cultivo en cada turno. La superposición de ambas situaciones puede provocar que el intervalo efectivo entre riegos para una misma planta se duplique, triplique o incluso se incremente en mayor magnitud, con efectos directos sobre la eficiencia de aplicación.

Para ilustrar esta relación, se desarrolla un ejemplo teórico-conceptual correspondiente a una parcela de cultivo de vid en el norte de Mendoza, con turnos fijos de 25 mm cada 8 días, bajo una condición en la que, en términos globales, la oferta hídrica satisface la demanda anual. Se analizan tres tipos de suelo: arcilloso, franco y arenoso; y se evalúa la eficiencia potencial de aplicación en función del porcentaje del predio regado en cada

turno (esto genera un cambio en la lámina aplicada a la planta), manteniendo constante el volumen total entregado y el intervalo de entrega del agua (Cuadro 10.6).

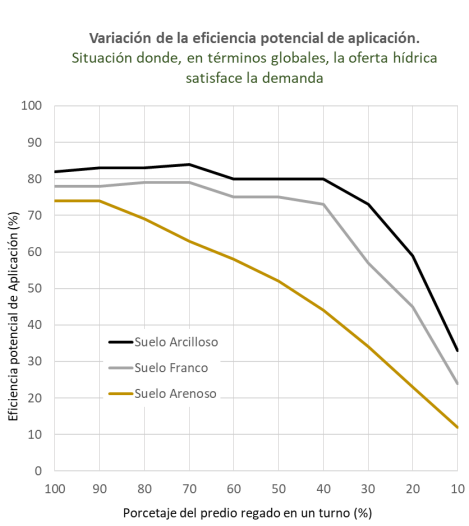
Se puede observar que, para suelos arcillosos y francos, la eficiencia potencial de aplicación se mantiene en valores elevados, superiores al 70%, hasta aproximadamente un 40% del predio regado por turno. A partir de ese umbral, la eficiencia disminuye abruptamente como consecuencia del aumento de las láminas aplicadas, que alcanzan el límite de almacenamiento del suelo y generan pérdidas por infiltración profunda o percolación por debajo de la zona radicular. En el caso de los suelos arenosos, la disminución de la eficiencia es más progresiva y se manifiesta desde las primeras reducciones en la fracción regada.

El análisis del déficit hídrico acumulado, Cuadro 10.7, permite complementar esta interpretación, mostrando que, al superarse ese umbral crítico de superficie regada, los valores de déficit aumentan rápidamente, evidenciando un deterioro en la condición hídrica del cultivo asociado al incremento del intervalo entre riegos.

El ejemplo muestra que la relación entre eficiencia potencial de aplicación y proporción del predio regado está directamente vinculada con la capacidad de almacenamiento del suelo y con la lámina aplicada en cada riego. Un cambio en la gestión de los turnos puede impactar de manera significativa en la eficiencia de aplicación si no se acompaña con una modificación en la estrategia de riego del productor.

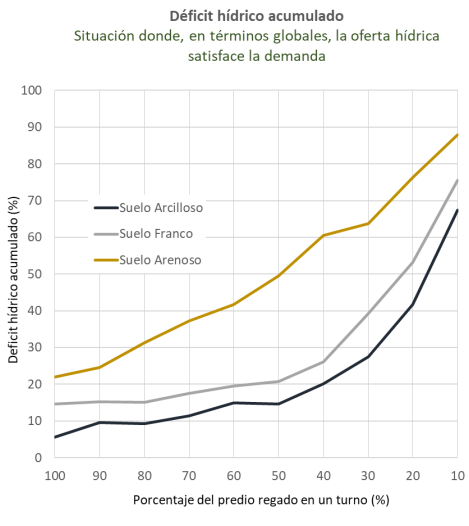
Cuadro 10.6

Variación de la eficiencia potencial de aplicación en función del porcentaje del predio regado en un turno



Cuadro 10.7

Déficit hídrico acumulado en función del porcentaje del predio regado en un turno.



En consecuencia, la optimización del uso del agua requiere no solo mejorar la eficiencia intrapredial, sino también atender la programación de los turnos, los caudales distribuidos y la oportunidad de entrega del recurso, dentro de las posibilidades que ofrece el sistema de riego.

10.5.4 Cuenta de Agua

La gestión de la distribución del agua en la provincia de Mendoza se desarrolla en un contexto de marcada variabilidad hidrológica con diferencias notables en la estacionalidad de las diferentes demandas hídricas generando un déficit estructural de la satisfacción de esta.

En este marco la Cuenta de Agua se define como:

> *Un instrumento de gestión de la distribución que permite registrar, ordenar y controlar, en un período determinado, la relación entre los volúmenes de agua asignados en el Plan de Erogaciones y los volúmenes solicitados, programados y efectivamente entregados, para cada canal, inspección o concesión, con el objetivo de mejorar la oportunidad de uso del recurso, adecuar las condiciones de entrega a las demandas de los usuarios y sostener los niveles de eficiencia requeridos por el sistema.*

La red de distribución de agua en Mendoza se organiza en dos niveles operativos claramente diferenciados: la distribución primaria y la distribución secundaria. Cada uno de estos niveles presenta actores distintos, lo que implica la existencia de dos cuentas de agua diferenciadas, aunque coherentes entre sí. Esta herramienta no constituye, por lo tanto, un único registro homogéneo, sino un instrumento que se adapta a la lógica operativa de cada nivel de la red.

En la distribución primaria, la Cuenta de Agua se aplica a escala de cuenca y tiene como usuarios a las Inspecciones de Cauce. Su función central es vincular el plan de erogaciones con la operación efectiva del sistema, permitiendo controlar los volúmenes derivados hacia cada inspección, registrar desbalances temporales y habilitar compensaciones posteriores dentro de la temporada de riego y permitiendo una cierta regulación interanual en años de sequía (si la capacidad de regulación de la cuenca lo permite).

En la distribución secundaria, la Cuenta de Agua se aplica a escala de concesión. En este nivel, la herramienta permite materializar el volumen asignado mediante distintas combinaciones de caudal, tiempo y frecuencia, adecuando las condiciones de entrega a las demandas reales, sin alterar el volumen total correspondiente al período completo considerado. La Cuenta de Agua secundaria posibilita así introducir flexibilidad operativa, integrar pedidos de riego y mejorar la oportunidad de uso, manteniendo el control volumétrico y la igualdad entre usuarios.

Ambas cuentas se encuentran jerárquicamente vinculadas: la Cuenta de Agua primaria establece el marco volumétrico dentro del cual debe operar la distribución secundaria, mientras que esta última materializa dicho marco en entregas concretas.

10.5.5 Distribución primaria

La distribución primaria o mayorista se basa en un sistema programado de entrega, cuyo objetivo principal es asignar y conducir los caudales disponibles desde las fuentes superficiales (ríos y embalses) hacia los canales primarios y secundarios. Este sistema constituye el primer nivel operativo de la gestión hídrica y condiciona el funcionamiento de la distribución secundaria.

10.5.5.1 Marco conceptual de las operaciones en la red primaria

El esquema aplicado en la provincia se apoya en el concepto de Caudal Ficticio Continuo (CFC), que representa el caudal medio continuo por unidad de superficie que le corresponde a cada inspección o canal durante un período determinado. Este indicador permite traducir el caudal total disponible en una referencia homogénea para toda la superficie irrigada. En términos operativos, el CFC actúa como un criterio rector para definir los volúmenes que cada canal debe recibir a lo largo del tiempo, independientemente de la modalidad concreta de entrega.

Dado que, en muchas situaciones, la entrega continua del caudal no resulta viable con la infraestructura y los métodos de riego existentes, el sistema mayorista, normalmente, opera mediante entregas no continuas en el tiempo, organizadas a través de turnos y variaciones de caudal. Esta lógica permite aumentar el caudal instantáneo, mientras que la regulación se apoya en las presas de embalse.

La gestión de la distribución primaria incorpora además el concepto de coeficiente de riego, que surge de relacionar el tiempo efectivo en que un canal recibe agua con el tiempo total considerado. Este coeficiente permite ajustar los caudales entregados a las restricciones operativas de cada canal. De este modo, un canal puede recibir caudales superiores al CFC durante ciertos períodos, siempre que el volumen total acumulado se mantenga consistente con lo programado en el plan de erogación.

Un aspecto central del sistema es el control volumétrico implícito, basado en la comparación entre la lámina programada y la lámina efectivamente aplicada (cuenta de agua). Cuando un canal solicita caudales distintos a los previstos, se generan desbalances temporales que se traducen en déficits o ahorros de agua, los cuales deben ser compensados en períodos posteriores. Este enfoque permite introducir flexibilidad operativa sin perder el control global, siempre que exista capacidad de regulación en cabecera y una gestión coordinada del sistema.

En Mendoza, este esquema general de distribución primaria es común a todas las cuencas, aunque presenta matices específicos según las características hidrológicas, la infraestructura disponible, el grado de regulación y la organización operativa de cada sistema. Algunas cuencas cuentan con mayor capacidad de regulación y permiten una gestión más flexible de los caudales, mientras que otras requieren esquemas más rígidos. No obstante, en todos los casos, la lógica subyacente es la misma: una distribución programada, basada en el CFC, con ajustes temporales de caudal y control del volumen total entregado.

10.5.5.2 Software de gestión y distribución del agua: SIDIS

La gestión de la distribución primaria del agua requiere herramientas que permitan traducir los conceptos de planificación, asignación volumétrica y operativo en decisiones concretas y verificables. En este marco, el Sistema Integrado de Distribución y Seguimiento (SIDIS), desarrollado por el Departamento General de Irrigación, constituye la principal herramienta operativa utilizada para la gestión de la distribución primaria en la provincia de Mendoza.

El SIDIS permite integrar, en un único entorno de trabajo, el Pronóstico de Escurrimientos, el Plan de Erogaciones, la superficie habilitada para recibir el agua (haSI), los datos operativos de la distribución (caudal, tiempos y volúmenes), la demanda hídrica en cada punto de derivación; y herramientas de visualización y comunicación de la información.

El objetivo es facilitar la aplicación de los criterios de distribución definidos para cada cuenca. Su utilización resulta clave para materializar los conceptos de control volumétrico, flexibilidad operativa y cuenta de agua desarrollados en los apartados precedentes.

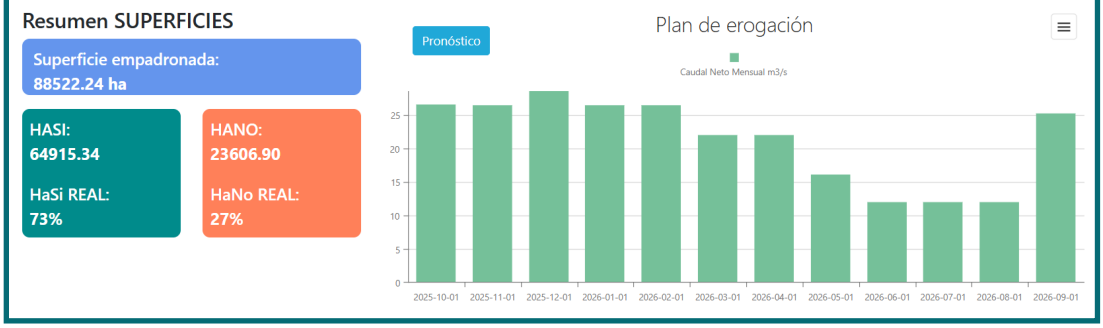
A modo de ejemplo, se describe para la cuenca del Río Mendoza, como se gestiona la distribución primaria para la temporada 2025-2026.

El Cuadro 10.8 muestra la pantalla que corresponde a una vista general del sistema SIDIS para la distribución primaria del río Mendoza, y cumple la función de punto de partida del proceso de planificación y control.

En el panel izquierdo se presenta el resumen de superficies empadronadas al momento de la consulta, distinguiendo la superficie total empadronada y su desagregación según categorías: haSí (superficie al día con el pago del canon de riego) y haNo (superficie que registra deuda y no está en condiciones de recibir agua), junto con la proporción real considerada en la operación. Esta información define la superficie sobre la cual se construye la asignación volumétrica y se estructura la Cuenta de Agua primaria.

A la derecha se muestra el Plan de Erogación definido oportunamente por la Jefatura de Distribución de la Subdelegación (en general se define en el mes de octubre de cada año), expresado como caudal neto mensual, derivado del pronóstico hidrológico, afectado por la infiltración en el río y las operaciones de regulación de los embalses.

Cuadro 10.8 Resumen general. Temporada 2025-2026. Río Mendoza.



El gráfico permite visualizar la variación temporal de la disponibilidad, la cual responde a una situación "media" de las estacionalidades de la demanda.

Siguiendo el procesamiento lógico del software, en el Cuadro 10.9 se muestra el seguimiento operativo de la distribución primaria a escala de cuenca, a través de un indicador porcentual, también se visualiza el avance de la lámina efectivamente distribuida respecto de la lámina total prevista para el período, además del remanente aún disponible. Esta vista sintetiza el control volumétrico acumulado y permite identificar, de forma inmediata, si la operación se encuentra alineada con lo programado, a nivel global, o si existen desvíos muy marcados que requieran ajustes.

El gráfico de la derecha muestra la evolución temporal de la superficie efectivamente abastecida a lo largo de la campaña. Esta información permite interpretar cómo la programación y la operación diaria se traducen en superficie regada.

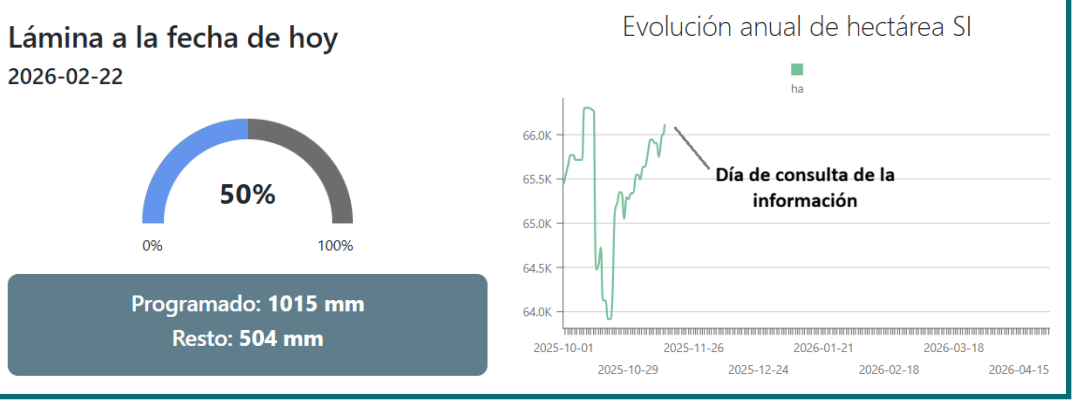
El Cuadro 10.10 muestra la traducción operativa del plan de erogaciones (definido en términos mensuales) a la escala diaria, que es el paso de tiempo en el que se ejecuta la distribución primaria.

Las barras representan la lámina programada diaria, resultante de dividir los volúmenes mensuales del Plan de Erogaciones, entre la superficie habilitada para regar y ajustarlas en función de la operación efectiva, incluyendo los pedidos puntuales de las Inspecciones de Cauce. La línea continua muestra la lámina acumulada, que expresa el volumen total distribuido a lo largo de la temporada.

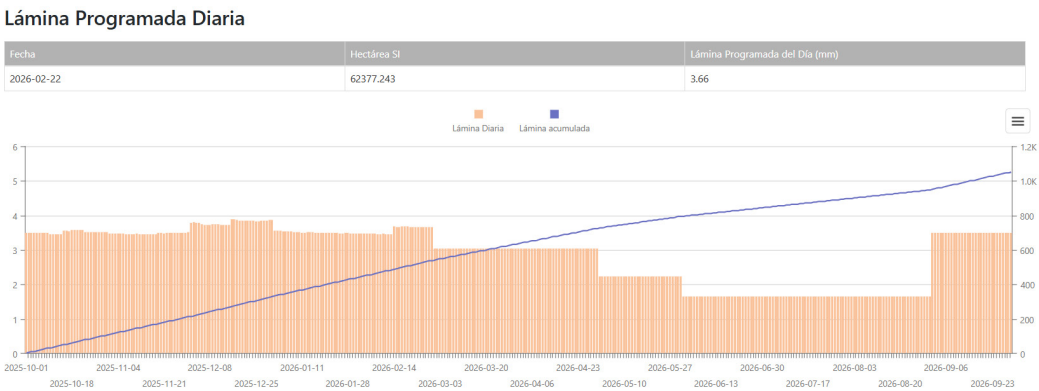
Este gráfico permite distinguir dos lecturas complementarias:

- Hacia atrás, hasta la fecha de consulta (22/02), se visualiza el histórico de la operación efectivamente realizada: caudales reales y pedidos puntuales. (Se ven los "*saltos*" que se produce en la lámina).
- Hacia adelante, se observa la tendencia proyectada si se mantiene el esquema definido en el plan de erogaciones (los valores son más "*suaves*", producto de la definición del plan de erogaciones que es mensual).

Cuadro 10.9 Estado de situación de las láminas programadas y entregadas al 22/02/2026; y evolución de la superficie al día. Río Mendoza.



Cuadro 10.10 Lámina programada diaria 22/02/2026. Río Mendoza.

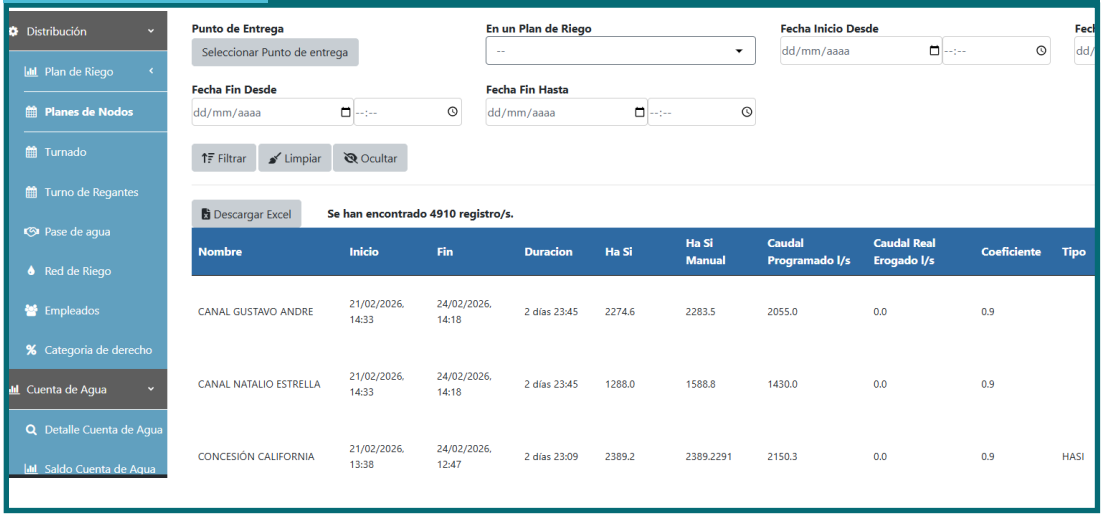


Esta representación facilita una lectura rápida del comportamiento del sistema, permitiendo detectar desvíos entre lo programado y lo entregado que puedan generar distorsiones en los volúmenes acumulados y requerir ajustes operativos importantes. En esta vista, el análisis se realiza a escala de cuenca, sin desagregar aún en canales particulares, consolidando una visión global del estado de la distribución primaria.

Continuando con la secuencia operativa, el Cuadro 10.11 muestra el nivel operativo de la distribución primaria, donde la programación definida a escala de cuenca se materializa en decisiones concretas por punto de entrega, canal o nodo.

La información se organiza en tablas estructuradas, en las que para cada nodo de entrega se definen las variables operativas principales: período de entrega, duración, superficie considerada, caudal programado y caudal efectivamente entregado. Estas variables resultan de la combinación entre el Plan de Erogaciones y los pedidos puntuales realizados por las Inspecciones de Cauce, permitiendo ajustar la operación sin perder coherencia volumétrica.

Cuadro 10.11 Planes o turnos de nodos. Río Mendoza.

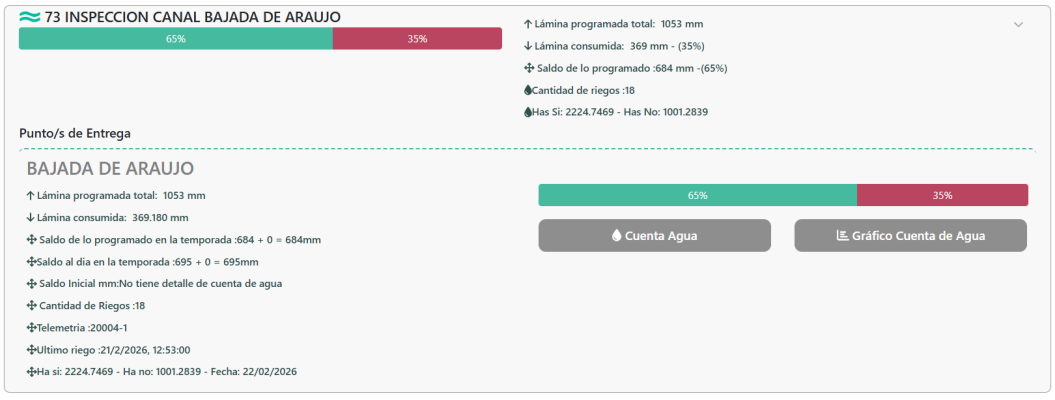


En el caso particular mostrado, el caudal real es nulo, esto significa que los canales no están regando, por más que la programación inicial indicaba que sí se hiciera. Probablemente responda a una situación puntual, por ejemplo la ocurrencia de lluvias que obligaron a dejar de operar los canales. Esto genera automáticamente que esas inspecciones estén almacenando agua en el Embalse Potrerillos para ser utilizados posteriormente.

Este esquema se replica para cada nodo definido en la red primaria, y la información histórica queda almacenada, lo que permite analizar el comportamiento pasado del sistema, evaluar desvíos, y alimentar procesos de prueba, corrección y ajuste en campañas posteriores.

El resumen sintético del estado de la Cuenta de Agua de cada inspección (Cuadro 10.12), muestra la relación entre la lámina total programada para toda la temporada (octubre de un año a setiembre del siguiente), la lámina efectivamente consumida y el saldo disponible.

Cuadro 10.12 Detalle operativo por punto de entrega de la Inspección Canal Bajada de Araujo. Situación al 22/02/2026.



El indicador visual permite identificar rápidamente el grado de avance de la campaña y el margen operativo restante.

El registro histórico de las entregas realizadas, detallando para cada evento los tiempos de riego (Cuadro 10.13), caudales programados, coeficientes aplicados, lámina entregada y saldo remanente, se detallan en la siguiente pantalla del programa. Este nivel de detalle permite reconstruir el comportamiento operativo de la inspección a lo largo de la temporada.

Cuadro 10.13 **Registro histórico de entregas y evolución del saldo. Canal Bajada de Araujo. Situación al 22/02/2026.**

BAJADA DE ARAUJO - Cuenta de Agua

Cantidad Inicial: 1052.80 mm+ 0mm

Inicio	Fin	Duracion	ha si	Caudal programado(l/s)	Coeficiente	Gasto mm	Lamina Acumulada mm	Saldo mm
30/9/2025, 12:30:00	3/10/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2354.1	2114.9	0.9	23.2	23.2	1029.6
9/10/2025, 12:30:00	12/10/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2351.5	2116.0	0.9	23.2	46.4	1006.4
18/10/2025, 12:30:00	21/10/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2396.4	2157.0	0.9	23.2	69.7	983.1
27/10/2025, 12:30:00	30/10/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2385.3036	2146.8	0.9	23.2	92.9	959.9
5/11/2025, 12:50:00	8/11/2025, 12:35:00	2 días 23:45	2314	2083.0	0.9	23.3	116.2	936.6
14/11/2025, 12:50:00	17/11/2025, 12:35:00	2 días 23:45	2353.4	2118.0	0.9	23.2	139.4	913.4
23/11/2025, 12:30:00	26/11/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2420	2178.0	0.9	23.2	162.7	890.1
2/12/2025, 12:30:00	5/12/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2412.9	2172.0	0.9	23.3	185.9	866.9
11/12/2025, 12:30:00	14/12/2025, 12:15:00	2 días 23:45	2408.6558	2167.8	0.9	23.2	209.2	843.6
20/12/2025, 12:50:00	23/12/2025, 12:35:00	2 días 23:45	2400.0986	2160.1	0.9	23.2	232.4	820.4
26/12/2025, 12:50:00	30/12/2025, 12:35:00	3 días 23:45	2392.2971	0.0	0	0.0	232.4	820.4
8/1/2026, 12:30:00	11/1/2026, 12:15:00	2 días 23:45	2369.429	0.0	0	0.0	232.4	820.4

Por último, el Cuadro 10.14 muestra el gráfico que constituye la herramienta por excelencia del seguimiento de la situación hídrica de la inspección, al reunir en una misma visualización la información operativa y la referencia teórica de demanda.

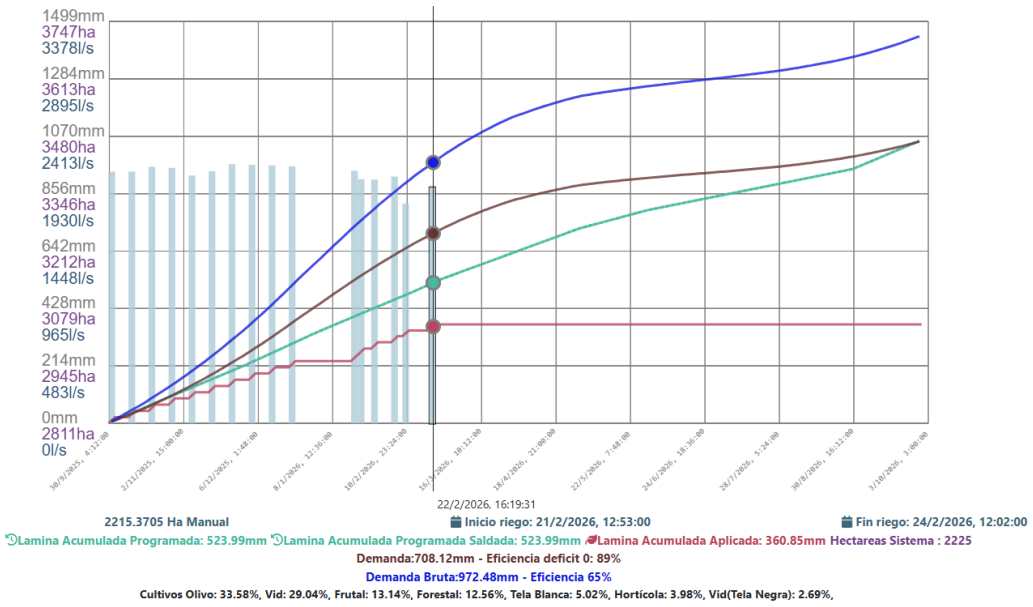
Las barras verticales (celestes) representan los eventos de riego, incorporando implícitamente la combinación de caudales y duraciones efectivamente realizadas. A partir de estos riegos se construye la lámina acumulada aplicada (línea roja), que permite cuantificar el volumen realmente entregado a lo largo de la temporada.

Las curvas de demanda muestran la evolución de la demanda hídrica teórica, calculada bajo distintos supuestos de eficiencia. Esta superposición permite comparar, en forma directa, el grado de ajuste entre oferta y demanda.

Al igual que en las vistas anteriores, el gráfico diferencia claramente dos momentos:

- hacia atrás, el histórico de la operación realizada,
- hacia adelante, una simulación de la evolución futura, construida a partir del Plan de Erogaciones y de las demandas medias de la cuenca.

Cuadro 10.14 **Análisis integrado de riegos, láminas entregadas y demandas teóricas. Canal Bajada de Araujo. Situación al 22/02/2026.**



Esta representación facilita al Inspector de cauce y al Jefe de Distribución de la Subdelegación, evaluar el estado actual de las dotaciones de la inspección, anticipar posibles déficits o excedentes y planificar ajustes operativos futuros, manteniendo el control del saldo de agua disponible y la coherencia con la planificación general. El caso particular de la temporada de riego visualizada, se observa como durante parte de enero y febrero el canal no estuvo dotado de agua, posiblemente por el efecto de lluvias intensas ocurridas en la zona.

La incorporación de estas herramientas de seguimiento y análisis consolida a la Cuenta de Agua como un elemento central de la gestión de la distribución primaria y del control operativo a nivel de inspección. La posibilidad de integrar, en un mismo entorno, la planificación, la ejecución y el análisis histórico y prospectivo de las entregas permite a los responsables de la distribución tomar decisiones informadas, ajustar oportunamente las condiciones de entrega y anticipar escenarios futuros.

10.5.6 Distribución secundaria

La distribución secundaria o minorista del agua, actualmente, se concibe como un sistema de gestión programada, orientado a organizar la entrega del recurso desde los canales secundarios hacia las hijuelas, ramas y tomas que abastecen directamente a los usuarios.

Existen en la provincia sistemas a la demanda con redes presurizadas, pero no se analizan en este capítulo. La propuesta se apoya en la existencia (real o potencial) de infraestructura de regulación, especialmente reservorios en la red secundaria, y en la incorporación de pedidos de riego puntuales por parte de los usuarios, sin perder el control volumétrico del sistema.

El eje central del esquema es que el volumen asignado a cada concesión o permiso, definido a partir del plan de erogaciones y del índice de riego, se materializa operativamente mediante turnos de riego preestablecidos.

Se identifican dos grandes tipos de sistemas de entrega en la red secundaria: sistemas continuos y sistemas intermitentes. La diferencia entre ambos no es conceptual sino operativa, y radica en la relación entre la duración del turno de riego de las hijuelas y el tiempo durante el cual el canal principal permanece con agua.

En los **sistemas continuos**, la interrupción del suministro del canal principal puede producirse en cualquier momento del turnado de una hijuela, sin coincidir necesariamente con el inicio o final del riego de un cauce menor.

Este tipo de esquema se presenta en cuencas o sectores donde no es posible regular la oferta (como áreas alimentadas por vertientes, arroyos o ríos que no cuentan con regulación en cabecera) o donde la infraestructura no permite cortes. En estos casos, cuando el canal riega, prácticamente todas las hijuelas reciben agua en simultáneo. El armado del turnado es simple y se basa en un tiempo fijo por superficie (minutos por hectárea), aunque la principal desventaja es la incertidumbre respecto del punto exacto en el que se producirá una eventual corta de agua. Como ventajas, presenta una alta independencia entre hijuelas y permite que, ante eventuales cambios en los caudales en cabecera, estos se distribuyan a lo largo de todo el canal y no afecten puntualmente a la hijuela que tiene agua en ese momento.

Por su parte, los **sistemas intermitentes** se caracterizan porque la hijuela completa una o más rotaciones enteras durante el tiempo en que el canal principal tiene agua. En este esquema, el riego de cada hijuela comienza y finaliza dentro del período de dotación del canal, lo que permite una mayor previsibilidad y control del turnado. Este tipo de sistema facilita la combinación de turnos entre hijuelas y ramas, ajustando tiempos y caudales según las necesidades de cada zona. Siendo un sistema más flexible que el anterior.

La diferenciación entre sistemas continuos e intermitentes resulta clave, ya que cada configuración condiciona la metodología de cálculo de los turnos, la secuencia de riego y la forma en que se distribuyen las variaciones de caudal dentro de la red.

10.5.6.1 Asignación volumétrica y programación de turnos

La asignación del agua en la distribución secundaria se expresa fundamentalmente en términos de volumen, definido a partir de la superficie empadronada en condiciones de recibir riego, el índice de riego del período considerado y la categoría de la concesión o permiso. Este volumen asignado para la campaña o para un período específico se traslada desde la cabecera del sistema primario hasta la cabecera del canal secundario mediante factores de uso que reflejan la operación real del canal.

El volumen que se programa entregar en cada turno resulta del producto entre caudal y tiempo programado, y la suma de los sucesivos turnos debe coincidir, al final del período, con el volumen total asignado en la temporada. En sistemas que operan con cuenta de agua, el usuario puede modificar caudales y frecuencias, generando ahorros o consumos adicionales que deben compensarse posteriormente, siempre respetando el balance volumétrico global.

10.5.6.2 Armado de la distribución en la red secundaria

Dentro de cada hijuela se calcula el volumen total a transportar durante el turno, siendo igual a la suma de los volúmenes asignados a los padrones que la integran. Este procedimiento se replica de manera ascendente, desde hijuelas a ramas y canales, hasta alcanzar la toma principal del sistema secundario.

A partir de los volúmenes definidos, se determinan las variables operativas de la distribución (caudales y tiempos) pudiendo adoptar distintas combinaciones:

- Caudales constantes con tiempos variables,
- Tiempos constantes con caudales variables,
- Ajustes simultáneos de caudal, tiempo y frecuencia.

El modelo propuesto permite estructurar la distribución en niveles jerárquicos (grupos, subgrupos e hijuelas), que pueden regar de forma secuencial o simultánea, según la configuración adoptada. Esta flexibilidad posibilita simular alternativas de distribución y seleccionar la más adecuada en función de la disponibilidad hídrica, la infraestructura y los usos locales.

10.5.6.3 Compensación de pérdidas en la red secundaria

Reconociendo que gran parte de la red secundaria y terciaria se desarrolla en cauces de tierra, con eficiencias variables según longitud, estado del canal y época del año,

es conveniente, en ciertos casos, realizar una compensación por pérdidas. El objetivo de la compensación es garantizar una equidad volumétrica, de modo que todos los usuarios reciban, en términos efectivos, un volumen similar por hectárea.

La compensación puede aplicarse a distintos niveles de la red (canal, rama o hijuela) y se basa en la estimación de las eficiencias de conducción de cada tramo. Una vez calculadas estas eficiencias, se ajustan los volúmenes programados, incrementándolos en los sectores más desfavorables y reduciéndolos en aquellos con mejores condiciones de conducción.

Este proceso debe analizarse de manera particular en cada caso y articularse con planes de mejora e inversión en infraestructura, a fin de evitar que las ineficiencias estructurales de ciertos tramos de la red se trasladen de forma permanente a usuarios que, si bien contribuyen al financiamiento de las obras, no reciben un beneficio directo de dichas inversiones.

10.5.6.4 Integración del riego por pedidos en sistemas de turnado tradicional

El riego acordado constituye un modelo de gestión que complementa los sistemas tradicionales de distribución por turnos, incorporando de manera explícita las demandas puntuales de los usuarios dentro de un marco programado y controlado. Este enfoque se basa en acuerdos entre los regantes y la inspección, orientados a adaptar la entrega del agua a las necesidades reales de riego, sin afectar la equidad del sistema ni el volumen total asignado a cada concesión o permiso.

En este esquema, los usuarios consensuan un calendario de riego o realizan pedidos específicos, que son integrados a la programación general de la red secundaria. La premisa fundamental es que las modificaciones introducidas por los pedidos de riego afectan la distribución temporal y operativa del volumen, pero no alteran el volumen total asignado para el período considerado, el cual se mantiene consistente con el plan de erogaciones.

La implementación del riego acordado requiere un proceso metodológico estructurado, que permita asegurar transparencia, previsibilidad y control operativo. Las etapas principales del modelo de gestión son las siguientes:

- **Identificación de los padrones de riego**: la gestión debe contener la totalidad de los regantes que participan del sistema y debe estar clara su vinculación con la red de riego.
- **Caracterización de la zona de riego**, incluyendo la configuración de la red, la ubicación de las tomas y las relaciones hidráulicas entre los distintos niveles del sistema.

- **Definición de objetivos**, estableciendo el alcance del riego acordado, sus límites operativos y las condiciones bajo las cuales puede aplicarse.
- **Establecimiento de acuerdos**, que pueden materializarse mediante calendarios de riego por tipo de cultivo o mediante pedidos puntuales y continuos, según las prácticas locales y la capacidad de gestión.
- **Implementación de un sistema de monitoreo**, orientado a verificar el cumplimiento de las entregas y el respeto de los volúmenes asignados.
- **Evaluación y ajuste del sistema**, incorporando mejoras a partir de la experiencia operativa y de las condiciones hidrológicas de cada campaña.

Este enfoque permite compatibilizar la flexibilidad requerida por los usuarios con la necesidad de mantener un control centralizado de la distribución.

Los pedidos de riego se traducen operativamente en una modificación del volumen asignado a una concesión o permiso para un turno determinado, sin alterar el volumen total correspondiente al período de análisis. Para facilitar la comprensión y la interacción con los regantes, se propone utilizar la superficie de riego como variable de pedido, dado que es la referencia tradicionalmente empleada para definir las dotaciones de agua, esto puede cambiar a la hora de aplicarlo a diferentes zonas.

La superficie solicitada constituye la entrada del pedido, mientras que el volumen de agua requerido se calcula a partir de los parámetros operativos del canal secundario. En ausencia de un pedido explícito, se asume que el regante desea recibir su turno normal, correspondiente a la superficie empadronada afectada por su categoría de concesión.

Una vez determinado el volumen correspondiente a cada regante para el turno considerado, se procede a agrupar los pedidos a nivel de hijuela, calculando el volumen total que debe transportar el cauce durante ese evento de riego.

A partir de este volumen agregado, se calculan los tiempos de riego individuales, respetando la lógica de distribución definida para la hijuela (riego secuencial o simultáneo, con caudales iguales o variables). De esta manera, los pedidos de riego se integran de forma ordenada a la programación del sistema secundario, manteniendo coherencia con los criterios de distribución previamente establecidos.

El modelo de pedidos de riego permite introducir flexibilidad operativa en la distribución secundaria, facilitando la adaptación a demandas reales y a condiciones cambiantes de la campaña de riego. Su correcta implementación depende de la existencia de infraestructura de regulación, especialmente reservorios, y de una gestión coordinada entre la autoridad de riego y los usuarios.

10.5.7 Modelos de gestión de reservorios

Los reservorios en redes de riego constituyen estructuras destinadas al almacenamiento temporal de agua, con el objetivo de regular la entrega del recurso en el tiempo. Forman parte integral de la red de riego y se caracterizan por su capacidad de almacenamiento, así como por los caudales máximos admisibles de ingreso y egreso, definidos por el diseño hidráulico de sus obras de toma y descarga.

La distribución del agua de riego se organiza mayoritariamente mediante sistemas a lámina libre (canales). Si bien existen sistemas presurizados, su presencia es minoritaria. En ambos tipos de sistemas, la incorporación de reservorios resulta un elemento clave para la implementación de esquemas de Riego Acordado, ya que permiten desacoplar parcialmente la oferta instantánea del recurso respecto de la demanda efectiva de los usuarios.

La instalación de reservorios, especialmente en la cabecera de sistemas secundarios o en tramos estratégicos de la red, permite mejorar el comportamiento hidráulico, reducir restricciones operativas y aumentar la capacidad de adaptación frente a variaciones temporales de caudal. En este sentido, los reservorios no cambian el sistema de distribución, sino que lo complementan ampliando las posibilidades de gestión.

10.5.7.1 Rol hidráulico y operativo de los reservorios

La función principal de un reservorio es la regulación. Esta función se traduce en la capacidad de absorber diferencias volumétricas temporales entre la oferta y la demanda, ya sea por variaciones naturales del caudal, por maniobras operativas aguas arriba o por ajustes deliberados en los turnos de riego.

10.5.7.2 Modelo general de gestión de reservorios

El modelo de gestión propuesto para los reservorios en redes de riego tiene como objetivo definir reglas de operación claras, que incrementen la flexibilidad en la entrega del agua y aseguren coherencia con la distribución secundaria. El análisis se limita a los reservorios integrados a la red de distribución, excluyendo los grandes embalses reguladores y los reservorios privados que no participan directamente de la programación del canal.

El modelo se estructura en dos niveles complementarios:

- Operación individual del reservorio, enfocada en el control de caudales instantáneos.
- Integración del reservorio con los turnos de riego, coordinando su funcionamiento con la programación de canales secundarios y terciarios.

Una de las funciones más relevantes de los reservorios es la amortiguación de pulsos de caudal, es decir, la absorción de variaciones transitorias generadas por maniobras de compuertas aguas arriba. En ausencia de regulación, estos pulsos producen aumentos o disminuciones momentáneas de caudal que afectan directamente a los regantes.

En una condición inicial de régimen estable, el reservorio opera de manera tal que el caudal de ingreso es igual al caudal de egreso, manteniéndose constante el nivel de agua almacenada. Ante una disminución repentina del caudal en el canal principal, el reservorio compensa entregando agua al sistema, sosteniendo el caudal aguas abajo. En la fase opuesta del pulso, cuando el caudal aumenta, el exceso ingresa al reservorio, incrementando su volumen almacenado.

La verdadera fortaleza del uso de reservorios radica en su integración con la distribución secundaria. Al actuar como elementos intermedios de regulación, los reservorios permiten desacoplar la programación de turnos respecto de las variaciones instantáneas de la oferta, facilitando la implementación de esquemas flexibles como el Riego Acordado.

En este marco, el reservorio funciona como un amortiguador operativo, capaz de sostener los caudales programados hacia hijuelas y tomas, aun cuando el sistema primario experimente fluctuaciones.

10.6 ANALISIS DE LAS MEDIDAS TOMADAS EN CONTEXTO DE SEQUÍA

La intensificación y persistencia de la sequía registrada en la provincia de Mendoza a partir de la última década constituyó el principal disparador de los procesos de mejora en la gestión de la distribución del agua. La magnitud del déficit hídrico y su prolongación en el tiempo pusieron en evidencia las limitaciones de los esquemas tradicionales de operación, obligando al sistema a adoptar, en una primera etapa, medidas de carácter reactivo, orientadas a mitigar los impactos inmediatos de la reducción de la oferta y a sostener el funcionamiento básico de la distribución; como ser el uso de volúmenes de agua almacenados en los embalses (a medida que la crisis de intensificaba, cada año los embalses comenzaban la temporada con menos reservas) o un mayor control sobre la superficie habilitada para regar.

A medida que la sequía dejó de ser un fenómeno coyuntural para consolidarse como una condición estructural, estas respuestas iniciales fueron dando lugar a cambios de mayor profundidad, tanto en los criterios de asignación como en los mecanismos operativos de la distribución primaria y secundaria. Este proceso implicó un tránsito desde soluciones de emergencia hacia ajustes estructurales en la gestión.

En este contexto, se volvió necesario profundizar el desarrollo de herramientas propias de gestión, capaces de integrar información hidrológica, planificación, operación, seguimiento en tiempo real y estudio de la demanda de los diferentes cultivos en las distintas

zonas. La incorporación y consolidación de soluciones digitales respondió a la necesidad de sostener estos nuevos esquemas de distribución, permitiendo materializar los cambios conceptuales y operativos.

Este proceso de mejora y flexibilización de la distribución no se encuentra exento de costos adicionales. Una operación más ajustada, controlada y adaptable requiere necesariamente mayores niveles de inversión, tanto en infraestructura y sistemas de medición como en el desarrollo, mantenimiento y actualización de herramientas digitales. Asimismo, implica un incremento en las exigencias operativas, demandando personal capacitado para la planificación, el seguimiento, el análisis de la información y la toma de decisiones en tiempo real.

En este sentido, la mejora en la gestión de la distribución no es neutra ni gratuita: supone asumir costos económicos y organizacionales asociados a una operación más compleja.

10.6.1 Actividades desarrolladas y su estado a inicios del año 2026

10.6.1.1 Herramientas para la simulación de planes de erogación

Problema: Cierta desconexión entre disponibilidad real de agua y la demanda de los cultivos y falta de criterios unificados para la confección de planes de erogación.

Actividad: Desarrollo de herramientas informáticas para la simulación de escenarios de planes de erogación y supervisión por parte de la Dirección de Gestión Hídrica.

10.6.1.2 Implementación de la “Cuenta de Agua” por inspección

Problema: Falta de control de los volúmenes asignados y entregados, dificultada para verificar el cumplimiento de la equidad en la distribución.

Actividad: Registro y seguimiento volumétrico por inspección y por concesión (láminas programadas, láminas consumidas, saldos).

Impacto positivo: Transparencia operativa, posibilidad de compensar desbalances, mejor planificación de turnos y reducción de conflictos por percepciones de inequidad.

10.6.1.3 Digitalización de la gestión de la operación

Problema: Operación poco integrada y comunicación insuficiente con usuarios.

Qué se hizo: Implementación de sistemas digitales para la gestión de la operación primaria y secundaria.

Impacto positivo: Mejor toma de decisiones, acceso público a información, mayor rapidez en ajustes operativos y flexibilización de las entregas manteniendo la equidad entre los usuarios.

10.6.1.4 Medición y evaluación de eficiencias de riego intrafinca

Problema: Desconocimiento de la eficiencia real de aplicación en parcelas; supuestos desactualizados.

Actividad: Relevamientos de eficiencia intrafinca y herramientas digitales para estimar necesidades de riego por cultivo.

Impacto positivo: Actualización de supuestos de demanda, mejores recomendaciones técnicas a productores y optimización de dotaciones a escala de cuenca.

10.6.1.5 Ajustes en la superficie en condiciones de recibir el agua

Problema: Asignaciones sobre superficies que no están al día con el canon de riego generando distorsiones en los turnos que aumentaban la ineficiencia del sistema.

Actividad: Programas para actualizar de manera automática la superficie habilitada y excluir parcelas abandonadas de la base de entrega.

Impacto positivo: Redistribución más justa de volúmenes hacia superficies productivas; mejor correspondencia entre asignación y uso efectivo.

10.6.1.6 Promoción de riego por pedidos y flexibilización de turnos

Problema: Rigidez del régimen de turnos que no responde a necesidades concretas de usuarios ni a la infraestructura disponible.

Qué se hizo: Implementación progresiva de sistemas acordados entre partes y mayor flexibilidad en condiciones de entrega (caudal, tiempo, frecuencia).

Impacto positivo: Mejora de oportunidad de riego, adaptación a cultivos/fechas críticas y reducción de pérdidas asociadas a entregas mal sincronizadas.

10.6.1.7 Suspensión temporal del otorgamiento de nuevos permisos precarios

Problema: Crecimiento de demanda por nuevos permisos en contexto de oferta restringida con posibles afectaciones a concesiones pre establecidas.

Actividad: Prohibición temporal de nuevos permisos precarios salvo excepciones (se analiza caso por caso).

Impacto positivo: Contención de expansión de demanda en fases críticas y protección de volúmenes disponibles para usos concesionados. Elaboración del Plan Maestro del Sector Hídrico.

10.6.1.8 Integración de conceptos de flexibilización en nuevos proyectos de modernización y mejora de redes de distribución

Problema: Falta de interacción entre el diseño de los proyectos y los nuevos requerimientos de flexibilización de la distribución.

Actividad: Determinación de caudales de entrega y por tramo ajustados a las necesidades de flexibilización y adaptación.

Impacto positivo: Nuevas obras que consideran, desde el diseño hidráulico, múltiples situaciones de entrega en función de diferentes condiciones de oferta hídrica, la sequía es una de ellas.

10.7 COMENTARIOS GENERALES

El análisis desarrollado en este capítulo permite concluir que la gestión de la distribución del agua de riego en Mendoza enfrenta un desafío estructural, asociado a la persistencia de la sequía y a los límites de un sistema concebido bajo supuestos de mayor disponibilidad hídrica. La evidencia hidrológica e histórica confirma que la escasez registrada desde comienzos de la década de 2010 no constituye un fenómeno transitorio, sino una condición prolongada que exige adaptaciones profundas en los esquemas de gestión.

Desde una perspectiva conceptual, el sistema mendocino refleja una superposición de paradigmas, donde persisten rasgos del enfoque hidráulico tradicional junto con avances hacia modelos más flexibles, orientados a la eficiencia y a la gestión de la demanda. Esta transición incompleta explica muchas de las tensiones actuales entre la normativa, la infraestructura disponible y las necesidades operativas del sistema de riego.

El análisis de la oferta y la demanda muestra que, si bien la disponibilidad de agua superficial está fuertemente condicionada por el clima, la capacidad de respuesta del sistema depende en gran medida de la gestión de la distribución. Las estrategias históricas basadas en el aumento de la oferta, en particular mediante la explotación de aguas subterráneas, permitieron amortiguar déficits en el corto plazo, pero hoy presentan restricciones ambientales y operativas que limitan su sostenibilidad.

La experiencia analizada demuestra que la flexibilización de la distribución, puede fortalecer la gobernanza del sistema si se apoya en información confiable, reglas claras y capacidad operativa. En síntesis, la adaptación del riego en Mendoza no depende exclusivamente de nuevas obras, sino de la integración efectiva entre infraestructura, gestión y participación de los usuarios, orientada a sostener el sistema hídrico provincial en un escenario de escasez persistente.

10.8 BIBLIOGRAFÍA

Berbel, J. y Gutiérrez-Martín, C. (Coords.). (2017). Efectos de la modernización de regadíos en España. Serie Economía, nº 30. Almería: Cajamar Caja Rural. ISBN 978-84-95531-83-4

Boninsegna, J., Villalba, R., & Urrutia, R. (2015). El cambio climático y los servicios del agua en la cordillera de los Andes. Mendoza: CYTED.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2. (2020). Atlas Sudamericano de Sequías (SADA): reconstrucción de la variabilidad hidroclimática 1400–2000 usando el índice de Severidad de Sequía de Palmer autocorrelado (scPDSI). Santiago, Chile: CR2.

Chambouleyron, J. (2002). Manual de riego y drenaje. Mendoza: Facultad de Ciencias Agrarias. UNCuyo.

DGI. (2016). Balance Hidrico Rio Mendoza. Mendoza.

Díaz, E., Rodríguez, Á., Dölling, O., Bertoni, J., & Smrekar, M. (2016). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Argentina. Tecnología y Ciencias del Agua, 125 - 133.

FAO. (2007). Modernizing irrigation management - the MASSCOTE aproach. Roma: FAO.

Gurovich, L. (1999). Alternativas tecnológicas y estrategias de riego en condiciones de sequía. Revista de derecho administrativo económico, 347 - 360.

Luque, J. (1955). Manual de agricultura bajo riego. Mendoza: Ediciones Riagro.

Pedregal Mateos, B. (2002). Planificación hidrológica y demografía: el estudio de la población en relación con los modelos de gestión del agua. Comunicación presentada en las VIII Jornadas de la Población Española, Santiago de Compostela, 13–15 de junio de 2002. Departamento de Geografía Humana, Universidad de Sevilla

PINTO, M. (2006). La administración y gestión del agua en Mendoza. Mendoza: III Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego.

Prieto, M. R., Rojas, F., Martín, F., Araneo, D., Villalba, R., Rivera, J. A. y Gil Guirado, S. (en prensa). Sequías extremas en Mendoza durante el siglo XX y principios del XXI. Administración de la carencia y conflictos socio-políticos. En G. Zarrilli y M.

Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). Tercera comunicación nacional de la República Argentina a la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Buenos Aires.

Velasco, I., & Montesillo-Cedillo, J. (2007). Elementos en la gestión de cuencas en condiciones de sequía. Gestión y Política Pública, 5 - 27.

Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Región y Sociedad, 35 - 71.

Villalba, c., Boninsegna, J., Mariano, M., Cara, L., Salomón, M., & José, P. (2016). Cambios Climáticos y Recursos Hídricos: El caso de las tierras secas del oeste argentino. Ciencia Hoy, 49 - 55.

11 GESTIÓN DE INUNDACIONES

M. Sc. Ing. Marcelo Alejandro Toledo[34]

11.1 RESUMEN

En esta ponencia se muestra la importancia de la hidrología para los ingenieros hidráulicos, civiles, ambientales y científicos relacionados con la tierra, pero aún más para los actores de gestión institucional de la provincia, debido a las implicaciones en el medio ambiente, de las inundaciones y sequías, abastecimiento de agua, generación hidroeléctrica, consideraciones sobre la calidad del agua, el riego y drenaje como en minería. Por tal motivo, resulta ser la ciencia pilar en la Gestión de Riesgos Hídricos (GRH) como así también en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y consecuentemente con la Seguridad Hídrica (SH).

Sin embargo, la hidrología aplicada en Mendoza y en especial en la gestión de inundaciones, no es por todos los actores suficientemente conocida y, por ende, su aplicación es confusa, sin interpretación y en la mayoría de los casos copiando aplicaciones, entendiendo que esto es posible, sin saber de reales consecuencias.

Mendoza, tiene que avanzar en lograr instituciones sólidas, altamente capacitadas y solidarias en la Gestión de Inundaciones, porque la problemática es única afecta a las mismas y sus consecuencias son negativas para la sociedad mendocina no logrando tener una adecuada Seguridad Hídrica.

34 Ingeniero Civil. Master of Science. Profesor Universidad Tecnológica Nacional

11.2 HIDROLOGÍA Y SU EVOLUCIÓN

La Hidrología es una ciencia natural multidisciplinaria que estudia la ocurrencia, circulación y distribución del agua sobre la tierra. El dominio de la hidrología incluye los procesos físicos, químicos y las reacciones biológicas del agua en los ambientes naturales y aquellos construidos por el hombre. Debido a la compleja naturaleza del ciclo hidrológico y sus relaciones con los patrones climáticos, tipos de suelo, topografía y otros factores geológicos, es difícil establecer fronteras entre la hidrología y otras ciencias de la tierra tales como: Meteorología, Geología, Ecología y Oceanografía entre otras.

La Hidrología Aplicada tiene entre sus disciplinas y en especial en la gestión de inundaciones, las siguientes aplicaciones: hidrología rural, hidrología de llanura, hidrología nival, hidrología urbana, y aunque atienden las inundaciones las mismas tienen diferentes teorizaciones y análisis.

11.2.1 Cronología

La historia inicial de la hidrología incluye las prácticas de administración de agua en las civilizaciones egipcias y sumerias (Mesopotamia) establecidas en el Medio Oriente en los ríos Nilo, Tigris y Éufrates y en la China a lo largo del río Amarillo. Las excavaciones arqueológicas en estos lugares muestran evidencias de estructuras hidráulicas que fueron construidas para irrigación y otros proyectos para el control del agua. Por ejemplo, en el año 4000 A.C. se construyó un canal para transportar agua dulce entre El Cairo y Suez (Alejandría).

Los filósofos griegos fueron los primeros investigadores de la hidrología. Aristóteles propuso la teoría de que la humedad del aire se convertía en agua dentro de las montañas y que ésta era la fuente de todas las corrientes de agua y Homero sugirió la idea de que existía un mar subterráneo que era el origen del agua superficial.

Las técnicas de medición de caudales se intentaron por primera vez en los sistemas de acueductos Romanos (97 D.C.) basados en la sección transversal del flujo. Estos teoremas continuaron hasta el "Renacimiento" cuando Leonardo Da Vinci descubrió una relación adecuada entre área, velocidad y caudal ($Q = V * A$) conocido como **Método Racional**.

La primera medición registrada de precipitación y flujo superficial fueron hechas en el siglo XVII por Perrault, quien comparó la cantidad de lluvia medida y el flujo estimado del río Sena, mostrando que ambas variables estaban relacionadas; estas observaciones fueron publicadas en 1694.

El astrónomo inglés Halley (1636 - 1742) utilizó una bandeja pequeña para estimar la evaporación del Mar Mediterráneo y concluyó, que era equivalente al flujo de los ríos tributarios. Mariote también midió la velocidad del flujo en el río Sena.

Estos comienzos modestos de la ciencia de la hidrología establecieron las bases para los avances de esta ciencia en el siglo XVIII, incluyendo el Teorema de Bernoulli, el tubo de Pitot y la fórmula de Chezy (1769), que constituyen la base de la hidráulica y las mediciones de fluidos.

Durante el siglo XIX, ocurrieron avances significativos en hidrología subterránea: La ley de Darcy para flujos en medios porosos, la fórmula de pozos de Dupuit-Thiem y también se desarrolló la ecuación de flujo capilar de Hagen-Poiseville.

En hidrología superficial se desarrollaron muchas fórmulas e instrumentos de medición que permitieron el inicio de la medición sistemática de las corrientes de agua. Humprey y Abbot (1861) efectuaron mediciones de caudales en el río Mississippi, y el U.S.G.S. (United States Geological Survey) estableció un programa para la medición y registro de caudales del Mississippi en 1888. Además, la fórmula de Manning se introdujo en 1889 y el medidor de corriente fue inventado por Price en 1885. Durante este período el gobierno de los Estados Unidos fundó una serie de agencias hidrológicas incluyendo el U.S. Army Corps of Engineers (1802), U.S. Geological Survey (1879) y el Weather Bureau (1891).

En física, las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido viscoso, nombradas así en honor al ingeniero y físico francés Claude-Louis Navier (1785-1836) y al físico y matemático anglo irlandés George Gabriel Stokes (1819-1903). Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes expresan matemáticamente la conservación del momento y la conservación de la masa para los fluidos newtonianos. Aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial, se manipulan aplicando ciertas consideraciones, principalmente aquella en la que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad (ley de viscosidad de Newton), obteniendo de esta manera la formulación diferencial que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

Como ya se ha dicho, las ecuaciones de **Navier-Stokes** son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales. **No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones**. Y, salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas, no es posible hallar una solución analítica, por lo que en muchas ocasiones es preciso recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante métodos numéricos se le denomina dinámica de fluidos computacional (CFD, de su acrónimo anglosajón Computational Fluid Dynamics).

El intervalo de tiempo comprendido entre 1900 hasta 1930 se denominó "**Período de Empirismo**" (Chow, 1964), debido a la gran cantidad de fórmulas empíricas que se desarrollaron; muchas de las cuales resultaron ser incorrectas. Las agencias del gobierno incrementaron

sus esfuerzos en la investigación hidrológica y se organizaron cierto número de sociedades técnicas para el avance de esta ciencia. Por ejemplo, el U.S. Bureau of Reclamation (1902), el Forest Service (1906) V el U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station (1928) fueron organizadas durante este período. Además, The International Association of Scientific Hidrology (1922) y The Hidrologic Section del American Geophysical Union (A.G.U.) empezó antes de 1930.

El período de 1930 a 1950 se le denominó "**Período de Racionalización**", el cual produjo un avance significativo en el campo de la hidrología; ya que las agencias de varios gobiernos desarrollaron programas de investigación hidrológica. Entre los avances significativos del período tenemos: Sherman (1932) estableció el concepto de hidrograma unitario, Norton (1933) desarrolló la teoría de infiltración, Theis (1935) formuló la ecuación de flujo inestable en hidráulica de pozos y Gumbel (1950) propuso el uso de la distribución de valores extremos para el análisis de frecuencias de datos hidrológicos, estableciendo las bases de la hidrología estocástica.

En este período el U.S. Army Corps of Engineers, el U.S. Weather Bureau (ahora National Weather Service), el U.S. Department of Agriculture (U.S.D.A.) a través del Soil Conservation Service (S.C.S.) y el U.S. Geological Survey (U.S.G.S.) aportaron contribuciones significativas a la teoría hidrológica y se continuó con el desarrollo de redes de medición para registrar la precipitación, evaporación y escorrentía. Estas agencias efectuaron estudios vitales y proporcionaron fondos para la investigación privada y universitaria en el área de hidrología. Las grandes presas, embalses, proyectos de control de inundaciones, etc. son el resultado directo de los avances en los campos de Mecánica de Fluidos, Sistemas Hidrológicos, Hidrología Estadística, Análisis de Evaporación, Tránsito de Avenidas e Investigación de Operaciones.

A partir de 1950, se conoce como "**Período de Teorización**", ya que la introducción de computadoras digitales en hidrología durante 1960 y 1970 permitió la simulación de problemas complejos de sistemas hidrológicos.

El primer modelo hidrológico comprensivo fue desarrollado por Crawford y Linsley (1966) en la Universidad de Stanford y se denominó Stanford Watershed Model (S.W.M.). Este modelo puede simular los procesos principales del ciclo hidrológico: precipitación (P), evaporación (E), transpiración (T), infiltración (F), escorrentía superficial (R) y flujo subterráneo (G).

Otro modelo que ha alterado significativamente el curso de la hidrología moderna es el programa IIEC-I (1973) desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, (HEC) Hydrologic Engineering Center, Davis, California. Este modelo simula inundaciones a partir de datos de precipitación utilizando hidrogramas unitarios y funciones elementales de pérdidas. Otro modelo que le acompaña es el HEC-2 (1976), desarrollado también por el Hydrologic Engineering Center, el cual efectúa cálculos de los perfiles de la superficie del agua para una geometría conocida del canal y caudales máximos, los cuales se pueden obtener utilizando HEC-I. En la actualidad estos modelos han evolucionado significativamente siendo los más utilizados en las aplicaciones civiles conocidos con el nombre de HEC-HMS ® (Hydrologic Model System) o HEC-RAS (River Analisys System) ®.

El Storm Water Management Model (S.W.M.M.) fue desarrollado por el U.S. Enviromental Protection Agency (E.P.A.) durante 1981 a 1988 y es el modelo más comprensivo para el análisis de escorrentía urbana en sistemas de alcantarillados.

El modelo ILLUDAS (Illinois Urban Drainage Area Simulator), desarrollado por Terstriep y Stalt (1974) está basado en un modelo del British Road Research Laboratory y utiliza un procedimiento simple de precipitación-escorrentía para la simulación de tormentas y el diseño de drenajes adecuados.

Estos modelos se han convertido en un instrumento utilizado frecuentemente por los investigadores e ingenieros hidrólogos y la lista representa algunos de los programas de computadora más poderosos de la hidrología moderna. El desarrollo de esta herramienta en los últimos 20 años ha ayudado directamente en la colección de datos hidrológicos al permitir la calibración del modelo contra los datos observados. Por consiguiente, se ha avanzado mucho con estos procesos en la comprensión del comportamiento de los sistemas hidrológicos.

Los modelos hidrológicos para computadoras desarrollados inicialmente en 1960 y 1970 han sido aplicados satisfactoriamente a otras áreas que anteriormente no se estudiaban o que estaban definidas empíricamente. Por ejemplo, hidrología urbana, hidrología de cuencas y planicies de inundación, diseño de drenajes, diseño y operación de embalses, análisis de la frecuencia de inundaciones y sequías; además, la administración y planificación de la cuenca de los ríos han resultado beneficiados por la aplicación de los modelos de computadora.

Las limitaciones de los modelos de simulación incluyen el peligro de creer que un modelo producirá resultados adecuados para todas las situaciones. Una confianza excesiva en los programas de computadora en la década de 1970 condujo a un tratamiento más cuidadoso de los modelos hidrológicos en la década de 1980, produciendo un regreso a las aplicaciones de los modelos que no excedieran la disponibilidad de datos satisfactorios de entrada. Sin embargo, la simulación de modelos en hidrología, al aplicarse correctamente, producirá la aproximación más lógica a la comprensión de los procesos complejos que ocurren en el ciclo hidrológico y, por lo tanto, nos encontramos en una **nueva era en la ciencia de la hidrología**.

11.2.2 Conceptualización

Seguramente, al ir analizando la historia los que conocen y aplican la hidrología les puede traer algunos recuerdos algunos temas enunciados, pero tal vez sería bueno reafirmar algunas particularidades de la actual hidrología.

- La hidrología es una ciencia que recién se ha conformado a mitad del siglo XX, por ende, es una ciencia muy moderna aún en desarrollo en el siglo XXI.
- La hidrología aplicada a inundaciones viene a darnos las condiciones de borde del medio inundable y resulta una herramienta poderosa de simplificación

de la hidrodinámica o la hidráulica del movimiento que aún es más compleja (las ecuaciones de Navier -Stokes del movimiento hidrodinámico, aún no se pueden resolver en forma completa en un medio natural ni con los actuales medios computacionales).

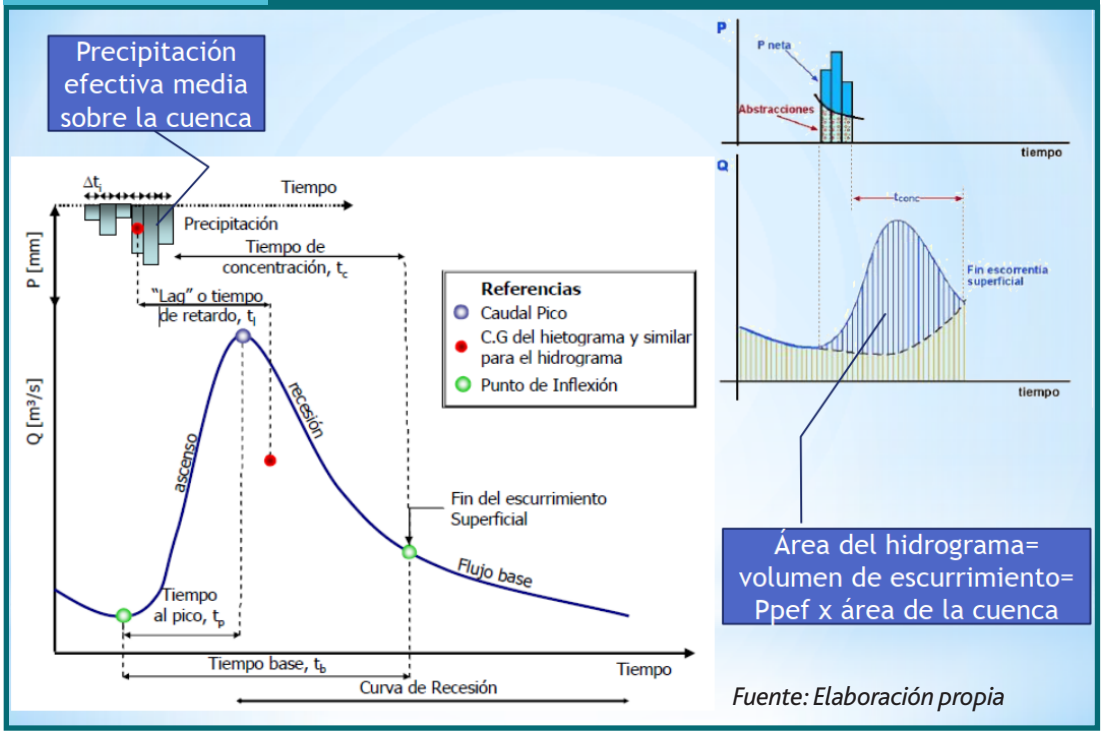
- La hidrología aplicada a inundaciones es diferente para zonas rurales, urbanas, de montaña o nivales, de remoción de masas o aludes, sin embargo, es común generalizar.
- La hidrología aplicada no es solo conocer la cantidad de milímetros de lluvia o de Equivalente Agua de Nieve, su intensidad, su frecuencia, su espacialización, si no que avanza en conocer el grado de respuesta de una cuenca, por ende, su hidrograma, pero tampoco se queda ahí, si no que avanza con la hidráulica en la definición de áreas inundables, procesos erosivos y de sedimentación en cauces y obras como puentes, presas, colectores, reservorios o retenes hidráulicos.
- La hidrología aplicada es fundamental para definir el Riesgo Hidrológico (R) asumido, en el diseño de una obra, en el grado de seguridad de una zona inundable. En este sentido, la información hidrológica de diseño de todas las obras como todos los planes deben estar vinculado al R, en la siguiente fórmula de R, se tiene un ejemplo:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{TR}\right)^{n} = 1 - \left(1 - \frac{1}{10}\right)^{50} = 0{,}99 = 99\%$$

¿Qué significa asumir un Tiempo de Retorno de 10 años, o una vida útil de 50 años en una obra y que el R asumido sea de 99%?

Con lo anterior algún lector que aplica hidrología, puede ir viendo hasta dónde llega su conocimiento. Por ejemplo, en el Cuadro 11.1 se tiene solo hasta la respuesta de una cuenca y si se le solicitara su explicación en base con algún caso que haya aplicado, es posible que se evidencie que no es idóneo en la hidrología de inundaciones. O con el Cuadro 11.2 , si alguna vez utilizó la curva Intensidad-Duración-Frecuencia del Instituto Nacional del Agua (INA,2008) que pueda explicar cómo se obtuvo las mismas, que representan y cómo se aplican.

Cuadro 11.1 **Hidrograma de crecida**



Fuente: Elaboración propia

Esto es solo una parte de la posible formación de una inundación, que puede ser un aluvión y/o una inundación, y a su vez en Mendoza en su historia (relatos periodísticos, noticieros, de vecinos propiamente dicho y de las propias instituciones) hemos generado en el inconsciente colectivo esta confusión de fenómenos sin conocimiento hidrológico, como si estos términos fueran iguales. Ejemplo de esto se puede ver en el siguiente punto.

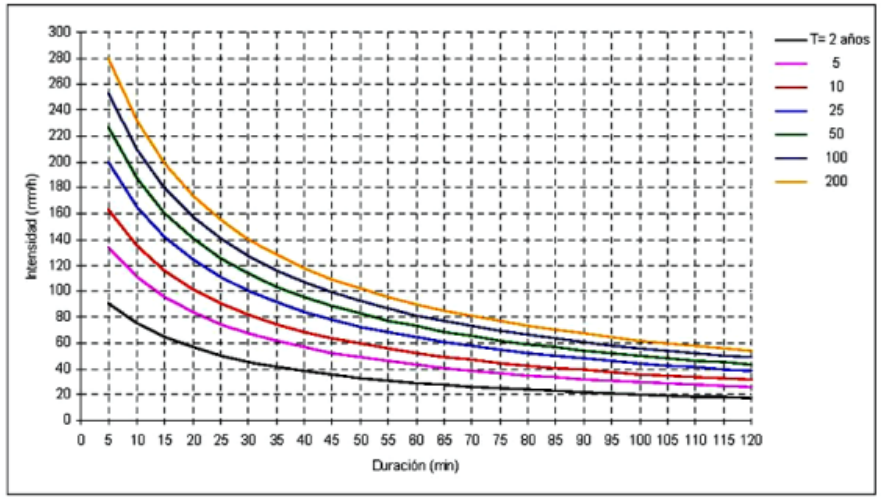
En el último tiempo hay una tendencia a explicar los "milímetros caídos", y algunos que han escuchado un poco más del tema en "tantos milímetros por hora" y algunos más osados "tantos milímetros por minuto" y no falta quienes, con más conocimiento, lo relacionan con los milímetros anuales, aunque a veces pueden usar distintas fuentes y dicen 200 mm, 220 mm, 240 mm, además, como si fuera menor el errar esta cifra. Esta tendencia es como que dan por cierto o entendido, que teniendo estos milímetros ya se conociera las consecuencias.

11.3 INUNDACIONES EN EL GRAN MENDOZA

Desde su fundación, la ciudad de Mendoza y sus alrededores sufrieron grandes anegamientos, desprendimientos de tierra y aluviones. El imaginario popular mendocino tiene mucho de sabiduría, pero también bastante de mito, como ese que afirma que las inundaciones y eventos de ese tipo no suelen ser comunes o frecuentes por ser esta tierra, "un oasis en medio del desierto". Sin embargo, que el clima sea árido no significa que una catástrofe no pueda ocurrir.

Instituto Nacional del Agua
Centro Regional Andino

Relaciones Intensidad Duración Frecuencia (IDF) para el pedemonte del Gran Mendoza



Relación IDF ajustada

$$I_{D,T_R} = \frac{\omega(T_R)}{(D+0.268)^{0.883}}$$

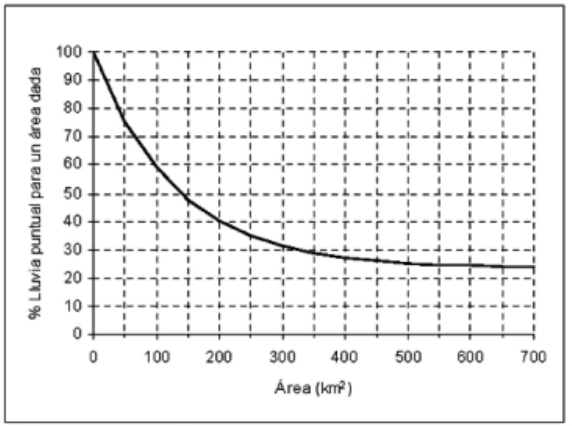
$I_{D,TR}$ = Intensidad (mm/h); D = Duración (h)

T_R (años)	2	5	10	25	50	100	200
$\omega(T_R)$	36.049	53.303	64.727	79.161	89.869	100.498	111.088

Hietograma de diseño de duración 1 hora

Tiempo (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
% Lámina total	4.2	9.7	12.7	14.0	14.0	13	11.2	8.9	6.4	3.9	1.7	0.3

Curva Lámina-Área para reducir precipitación puntual a valores promedios en el área



Relación Lámina-Área ajustada

$$\%\ \text{Lluvia puntual} = 1 - 0.7632\left(1 - e^{-0.00769\ A}\right)$$

A = Área (km²)

Mendoza, marzo de 2008

Fuente: Centro Regional Andino del INA

En el importante trabajo realizado por el escritor Raúl Silanes (QEPD) en el año 2014, "Breve historia de los aluviones del Gran Mendoza" para el Departamento General de Irrigación, se presenta un resumen histórico con fuentes de información de diversos eventos de crecidas e inundaciones en la provincia de Mendoza y que algu- nos se exponen a continuación.

El **8 de abril de 1562** se mencionan en un Acta Capitular crecidas que causan estragos en la población, por lo cual se intenta afanosamente poner remedio al problema aluvional, recomendando "ver por dónde entra el agua en tiempo de avenidas, para poner remedio a ello y que no se inunde la ciudad".

El problema aluvional es remarcado en distintas Actas, afirmándose el **5 de enero de 1609**, que "De acuerdo a la resolución de este Cabildo, conviene enderezar la acequia de esta ciudad y la del molino, por lo cual conviene repararlas y ahondarlas por causa de que cuando llueve, se derrama el agua, la que anega la ciudad y viene a poner especialmente a las casas del Cabildo a punto de caerse por dicha causa". Se describe también la rotura de acequias e inundación de las casas del Cabildo.

En **1610 Mendoza** "era una aldea pequeña, de sólo 32 casas, dos de ellas con techo de tejas, las demás de barro y paja", comenta Edmundo Correas, quien además agrega que "su existencia era precaria y su destino era incierto". Estaba incomunicada con Santiago durante el invierno y muy alejada de otras ciudades comerciales importantes. La población originaria disminuía, mientras que la española crecía.

En **1716** una gran inundación destruyó gran parte de los edificios céntricos, entre los que se hallaba la iglesia de Nuestra Señora de Loreto.

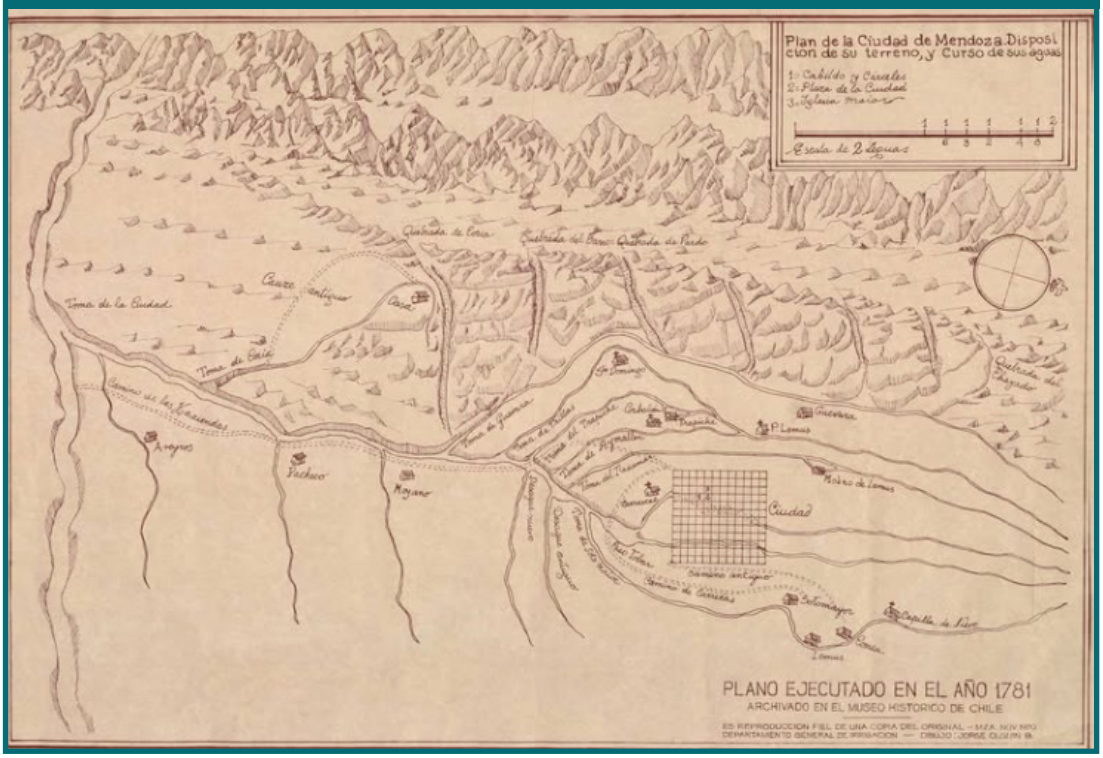
En **1754** una inundación puso en peligro a los pobladores de la vieja ciudad fundada en 1561.

En distintos documentos del Archivo Nacional de Chile, que en su mayor parte corresponden a la época del Corregidor Villalobos (1759-1766), se hace referencia a que repetidas veces dispuso recursos para construir obras que significaran, simultáneamente, un aprovechamiento adecuado de las aguas y una defensa contra el peligro de los aluviones en la ciudad. El 20 de diciembre de 1760, el Procurador de la Ciudad, Pedro Correas, expone que "Por las calles que bajan de poniente a oriente de la barraca, siempre que hay una avenida de aguas está expuesta a perderse la ciudad".

No es casual que el plano de la Ciudad de **1781** sea otro documento que da la pauta del problema aluvional, ya que es fácil interpretar en él que, como argumenta Adolfo Cueto, los tapiales externos e internos constituían barreras para contener el avance de las aguas

En otras palabras, los externos envolvían la ciudad y los internos las propiedades protegiéndolas de manera precaria. Un decreto del 12 de abril de 1761, dictado por la Real Audiencia en Santiago de Chile, habla de la construcción de un tajamar, para impedir que las crecientes del río inunden y destruyan la ciudad de Mendoza (parecidos a los diseñados por el irlandés Ambrosio O'Higgins para el río Mapocho).

Cuadro 11.3 Plano de la ciudad de Mendoza de 1781, titulado "Disposición de su terreno y curso de sus aguas". Trazado y memoria colonial



Fuente: Archivo Nacional de Chile

Este plano histórico, ejecutado en 1781 (Cuadro 11.3) y archivado en el Museo Histórico de Chile, representa una de las primeras cartografías urbanas de la ciudad de Mendoza, en el entonces Virreinato del Río de la Plata. El documento muestra la disposición del terreno, el trazado urbano y el sistema hídrico que articulaba la vida agrícola y doméstica de la región. La ciudad aparece organizada en damero colonial, con canales, acequias y ramificaciones del Río Mendoza, fundamentales para el riego y la subsistencia. El plano refleja la importancia de la ingeniería hidráulica indígena y criolla, que permitió adaptar el asentamiento a un entorno árido mediante un sistema de distribución de aguas que aún hoy define la identidad urbana mendocina. El plano fue reproducido fielmente en 1970 por el Departamento General de Irrigación de Mendoza, con dibujo de Jorge Olguín, y forma parte del acervo del Archivo General de la Nación Argentina. Incluye el traza- do de calles, ubicación de canales, orientación geográfica mediante rosa de los vientos, y representación de montañas y cursos fluviales. Es una fuente clave para entender la pla- nificación urbana colonial, el uso del agua como recurso estratégico y la relación entre ciudad y paisaje andino. Este plano no solo documenta la Mendoza del siglo XVIII, sino que también permite rastrear la evolución de su sistema de acequias, su lógica de asen- tamiento y su vínculo con el agua como bien común.

El Cabildo dispone el **23 de agosto de 1808** la creación de la Alameda, y en un párrafo del Acta, comenta que se ha "concretado con don Antonio Moyano, para que con la equidad posible ceda el terreno que sea pasible de ocupar en el ensanche de dicho paseo, con conocimiento del que deba quedar para el cauce principal, de modo que sea capaz de recibir las avenidas para que éstas no se introduzcan dentro de la ciudad y causen daños que son consiguientes". Con respecto a este documento, el historiador Ricardo Ponte afirma que en la actual avenida San Martín, existían dos canales en el tramo de la Alameda: el de la margen Oeste funcionaba como colector de las aguas aluvionales y se denominaba Colector Moyano, mientras que el de la margen Este era el actual Tajamar.

Una marca importante en la cronología de los aluviones en la ciudad, es la jornada trágica del **10 de febrero de 1824**,"cuando la urbe fue atacada por un poderoso torrente y las calles se convirtieron en verdaderos ríos. A las 18 horas la fuerte lluvia desatada se viene sobre la población en la dirección de la boca del río, desatando uno de los más poderosos aluviones de la historia" (Relato editorial recordatorio, del diario El Constitucional, 12 de febrero de 1856). Este fenómeno dejó un saldo de 20 muertos, además de la destrucción de las obras de defensa aluvional a la vera del Canal Jarillal.

En ese período, más precisamente el 7 de julio de 1824, el ministro secretario Agustín Delgado, crea el Juzgado de Aguas de Irrigación, por mandato expreso del recién asumido gobernador Juan de Dios Correas.

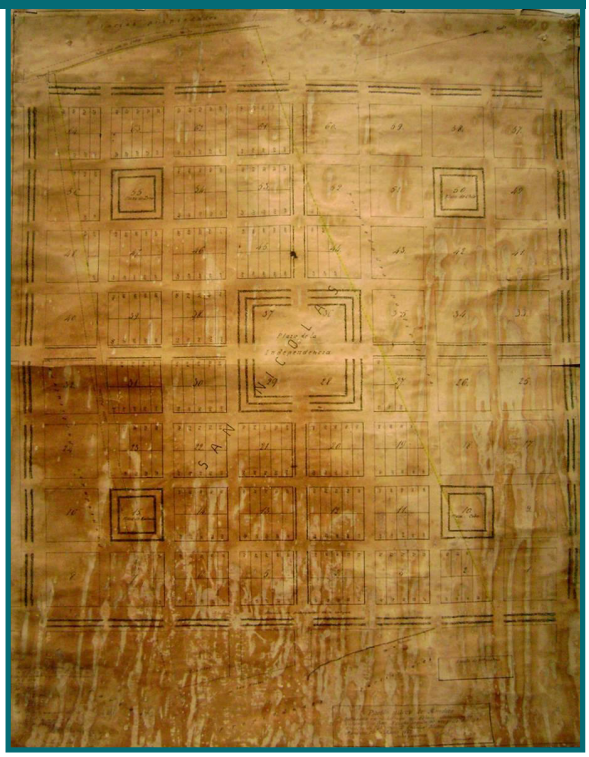
En el plano topográfico de la ciudad de Mendoza de aquella época **(1825)**, las calles muestran una marcada sinuosidad, como producto del "desdibujamiento de las arterias de agua, debido a los constantes aluviones" (Ricardo Ponte). Esta característica ya había sido registrada por el Arzobispado de Chile en **1744**, al describir la ciudad, diciendo que "las calles están desniveladas fruto de los constantes aluviones y empantanamientos provocados por las acequias al desbordarse".

Posteriormente, el mismo gobernador Juan de Dios Correas, dicta el **13 de mayo de 1825** una ley suprimiendo el empleo de Juez de Aguas, "para reasumir sus atribuciones el Juez de Policía, sin jurisdicción ordinaria en uno ni otro ramo". Además, contempló las necesidades de la población: en ese sentido, ordenó obras de defensa aluvional, canalización del Tajamar, y un puente sobre el Zanjón, entre otros emprendimientos.

Tal como rescata la Página Oficial de la Municipalidad de la Ciudad de Mendoza, a historia de Mendoza experimentó un giro trascendental cuando, tras el devastador terremoto de **1861**, el ministro Eusebio Blanco y el ingeniero francés Julio Balloffet se unieron en la misión de diseñar una ciudad vanguardista. Este anhelo culminó con la aprobación del plano del municipio citadino en 1863, marcando el nacimiento de la nueva Ciudad de Mendoza, la que hoy conocemos.

Para comprender la magnitud de este cambio, debemos remontarnos a **1561**, cuando los españoles llegaron al Valle de Huentata y fundaron la ciudad con un trazado de damero, pero fue el catastrófico sismo de **1861** lo que desencadenó la necesidad de reinventar la urbe.

Cuadro 11.4 **Pueblo Nuevo de Mendoza Trazado por el Ing. Julio Balloffet (1863)**



Fuente: Centro Interdisciplinarios de Estudios Regionales (CEIDER)

Tras el devastador terremoto de **1861** (Cuadro 11.4), Mendoza fue rediseñada por el ingeniero Julio Balloffet, quien proyectó la Ciudad Nueva con un trazado racionalista de 64 manzanas y cinco plazas equidistantes. En el centro de ese damero urbano se ubicó la Plaza Independencia, la más extensa y simbólica, con 4 hectáreas de superficie. La imagen de 1863 registra uno de sus elementos más distintivos: el estanque central, rodeado de senderos, árboles y simetría paisajística. Este espejo de agua no solo embellecía el espacio, sino que respondía a los ideales higienistas y estéticos de la época, que asociaban el agua con salud, frescura y civilización. El estanque fue parte de una serie de intervenciones que buscaban convertir la plaza en un centro cívico y recreativo, con bancos, faroles, esculturas y fuentes. Frente a ella se ubicaba la Casa de Gobierno, y más tarde se proyectó allí el Museo de Ciencias Naturales Cornelio Moyano, antes de su traslado al Parque General San Martín. A lo largo del siglo XX, la plaza fue remodelada en varias ocasiones, pero el estanque original —visible en esta imagen— representa el espíritu fundacional de la Ciudad Nueva: orden, belleza y modernidad en el corazón de Mendoza.

Además, no solo marcó un hito en el urbanismo mendocino, sino que también introdujo el Sistema Métrico Decimal, siendo un pionero en América. Su visión no se limitó a las dimensiones físicas, sino que se extendió al desarrollo territorial, realizando la primera

triangulación de la provincia desde el cerro "Jejenes", más tarde rebautizado como "Cerro del Pilar" y finalmente como "Cerro de la Gloria" construyendo allí un hito geodésico.

Este genio geométrico no solo dejó huella en el plano de la ciudad. Fue protagonista en importantes proyectos de canalización y contribuyó al catastro local con una precisión geodésica única. Su legado persiste en la infraestructura y en la meticulosa planificación que definió la Mendoza moderna.

Con el paso del tiempo, la ciudad adoptó un perfil dinámico y moderno, marcado por la llegada del ferrocarril en 1885, la inmigración masiva y el auge de la vitivinicultura.

Desde principios del siglo XX, la antigua ciudad del siglo XVI y la moderna del XIX se conectaron a través de la avenida San Nicolás, hoy conocida como San Martín.

En las décadas siguientes, arquitectos como Daniel Ramos Correas y los hermanos Civit lideraron el desarrollo de una Mendoza moderna y en constante evolución. Desde su fundación hasta hoy, la ciudad ha crecido continuamente, convirtiéndose en un vasto territorio urbanizado que se expande sobre el oasis norte, dando forma al Gran Mendoza que conocemos en la actualidad.

Durante el verano de **1878** se produce otro aluvión importante. El 20 de enero dos crecientes consecutivos azotan la ciudad. En una nota de El Constitucional del 24 de enero, titulada "Creciente", se detallan los hechos: que "pusieron en serios apuros a muchos vecinos de la calle San Nicolás (hoy San Martín), quienes veían en inminente peligro la existencia de sus casas y se apresuraban a improvisar diques en las puertas exteriores para contener la invasión del torrente. En la calle Escarpe (hoy Alem) la creciente ha sido mayor, pues aquello era un verdadero río navegable".

El aluvión provoca enormes pérdidas, sobre todo en la Capital de Mendoza, dejando un saldo de 24 muertos. Grandes extensiones de terreno quedan inundadas, además de los daños que ocasiona en toda la red primaria de riego. Ese mismo día por la noche, el gobernador Moyano nombra una Comisión para auxiliar a los inundados de la ciudad y los Departamentos próximos a ésta, designando como miembros a César Cipolletti, Luis Lagomaggiore, Manuel Bermejo, Julián Barraquero y José Néstor Lencinas. Un día después, el Gobernador ordena a Cipolletti "estudiar y proyectar las obras que sean necesarias, para evitar los aluviones que bajan de la sierra", agregando su intención de crear un fondo con dinero destinado al auxilio de los inundados.

El 8 de febrero, el presidente Uriburu envía a Mendoza $ 100.000.-, "para las obras de defensa aluvional proyectadas por Cipolletti y para el socorro de las víctimas de la inundación en esa provincia". Simultáneamente, el ingeniero italiano termina los estudios de la Toma Común que surtirá de agua a los canales Santa Rosa, Dormida y La Paz, iniciando la confección de planos y presupuestos, bajo la dirección del ingeniero Federico Knoll, con un sueldo mensual de $ 350.-

La Ley 3.219 de 1895, autoriza un subsidio especial para los damnificados por la inundación en la Ciudad de Mendoza. Y la ley provincial 115 de 1899, permite suscribir

un convenio entre Mendoza y la Nación para ejecutar distintas "obras sanitarias", destinadas a "asegurar el servicio básico de agua potable de calidad mediante obras que resistan en lógica medida el problema de los aluviones".

En 1900 se produce una crecida en el río Mendoza, que destruye parte del Dique Luján, hoy Cipolletti, y deja sin agua al Canal Cacique Guaymallén que proveía este elemento a la ciudad. Dos días después una fuerte lluvia caída en las serranías del oeste, provocó una avenida torrencial que inundó propiedades, viñas y casas.

En 1920 una crecida del río Mendoza, destruye parte de las obras de defensa existentes en La Toma (Toma de Los Españoles). El hecho se repite el **31 de enero** del mismo año, provocando nuevamente pánico en la población.

El **10 de enero de 1934** (hoy conocida como la Crecida del El Plomo): los diarios locales rescatan que un despacho telegráfico del jefe de la Estación Punta de Vacas del ferrocarril Trasandino, dice: Del río Tupungato baja fuerte creciente, el agua alcanza siete metros de altura". Una hora más tarde, otro despacho agrega: "Creciendo arrastró puente kilómetro 142 a trescientos metros distancia"... La catástrofe se originó en Punta de Vacas, en la confluencia del río Tupungato con el río Mendoza. Las aguas destruyeron la Usina de Cacheuta, el Hotel de esa localidad, casas, caminos, puentes, edificios y vías férreas que se hallaban a su paso.

El número de víctimas sobrepasó las 20 personas y los daños se estimaron en más de 250.000 dólares.

Después de la destrucción por un aluvión en **1934**, el Estado Argentino reconstruyó con una variante un tramo del Ferrocarril Trasandino que corría por la orilla derecha del río Mendoza. La variante arrancó en el Km 117 del Trasandino. Km 1200 del nuevo kilometraje tomado desde Santa Fe. Allí, con un nuevo puente sobre el río Mendoza, la variante comenzó a desarrollarse por la orilla izquierda, buscando terrenos más seguros.

En **1937**, se sanciona la Ley 1235, bajo el lema "Emisión de Títulos de Deuda Pública Interna de la Provincia de Mendoza" (en un principio se habían pedido $ 2.500.000.-), firmada por Guillermo Cano, Frank Romero Day y Enrique A. Pontis. La misma justifica dicha emisión de títulos públicos, aduciendo que el monto recaudado se volcará en obras de defensa contra los aluviones "que tanto preocupan a muchas zonas rurales afectadas"; además de una ampliación del Canal Matriz Tupungato, derivado del río Las Tunas. Finalmente, la Legislatura autoriza al Poder Ejecutivo provincial a emitir títulos de deuda hasta $ 13.700.000.-, para, entre otros proyectos (escuelas, pavimento, ampliación de hospitales, policía, etc.), perforaciones destinadas a la dotación de agua potable, instalación de surtidores públicos de agua corriente, obras de reencauce del río Malargüe, filtros de agua y préstamo al Departamento General de Irrigación por $ 5.000.000.-, para construir distintas obras. La Ley 1235 lleva la firma de Armando Guevara Civit, en su calidad de presidente de la Cámara de Diputados; y la de Carlos Puga, como presidente de la Cámara de Senadores.

En **1934** se construye el dique San Isidro, en el año 1939 se construye el Dique Frías, en **1942** el Dique Maure y en 1**942** el Dique Los Papagayos.

En los años **1954, 1956 y 1957**, se produjeron considerables crecidas en el río Mendoza que provocaron daños, especialmente en las zonas de Cacheuta y Potrerillos.

El **31 de diciembre de 1959** una intensa lluvia, caída en las cerrilladas del oeste y sobre la ciudad misma, provocó inundaciones y daños en el centro de Mendoza. El comercio resultó muy perjudicado, pero no se registraron víctimas. Las pérdidas económicas fueron superiores a los 220.000 dólares. Es la lluvia más importante registrada en el gran Mendoza.

El **4 de enero de 1968**, se produjo otro evento de importancia en el departamento de Las Heras. Las pérdidas fueron calculadas en 435.000 dólares. El mismo día, otra avenida torrencial asoló el departamento de Tupungato que arrasa plantaciones y las pérdidas se estimaron en 2.150.000 dólares.

Otro acontecimiento digno de ser destacado en el aluvión que asoló el departamento de Las Heras, el **4 de febrero de 1968**. Una enorme masa de arena y barro se desplazó sobre ese departamento y quedó depositada en importantes arterias y propiedades aledañas.

El **4 de enero de 1970** y por esas extrañas casualidades se presentó otro aluvión –uno de los más grandes que afectó a Mendoza– que pudo ser visto por miles de mendocinos. En aquel entonces no existía la televisión por cable y la gente centraba su atención en los canales 7 y 9. El canal 7, precisamente, tenía sus estudios en la intersección de San Martín y Garibaldi y los camarógrafos –a través de las ventanas– pudieron captar nítidamente la angustia de quienes desde los edificios veían crecer el agua en la calle y la desesperación de los automovilistas por abandonar sus rodados y buscar una tabla de salvación.

Muchos más, aquellos que viajaban desde el Este, el Norte y el Sur, tuvieron la suerte de no poder llegar a la ciudad. El puente Olive, que conectaba con Luján por calle Cervantes (todavía no existía el Acceso Sur) había sido arrastrado por el agua; los que vinculaban con Guaymallén estaban en pie, pero el agua había desbordado el Cacique Guaymallén y los dejaba intransitables. Lo mismo ocurría con todos aquellos que unían a la ciudad con Las Heras como consecuencia de la crecida del zanjón de Los Ciruelos.

La tragedia comenzó poco antes de las 18. El agua que bajó desde el dique que colapsó y desbordo el zanjón Frías. Se rompieron las losas de los costados y los socavones en la tierra de los márgenes arrastraron viviendas y todo lo que encontraran en las cercanías. Como toda la red hídrica estaba colapsada, el agua y el lodo buscaron otra salida. Y la encontraron en la calle San Martín.

La crónica de Los Andes es dramática. "Un furioso torrente de agua marrón descendió de los cerros, colmó la capacidad de los zanjones y desbocó por todas las calles de la ciudad", decía. Más adelante señalaba que "casi a las 18.15 vimos bajar, rugiente, el agua por la avenida San Martín. El primer frente comenzó a llevarse sillas y mesas ubicadas en las veredas. Poco después aumentó considerablemente el caudal de la crecida y los

automóviles estacionados comenzaron a flotar. Primero se movió un coche chico y seguidamente los más grandes. La avenida San Martín se llenó de chapas que crujían", decía el periodista.

Las pérdidas habían sido cuantiosas (calculadas en 5.000 millones de pesos de aquella época) y las informaciones posteriores fueron más dramáticas aún. El agua había arrastrado viviendas en los barrios aledaños al zanjón de Los Ciruelos, arrancó la pasarela ubicada a la altura de calle Cipolletti y se llevó columnas de cemento. El puente "recientemente habilitado" sobre el zanjón Frías, en Paso de los Andes y Moreno, en Godoy Cruz, había sido batido violentamente por las aguas. En el barrio Cívico, el agua inundó los sótanos de la Casa de Gobierno, mientras los jardines estaban cubiertos de agua, tambores de gasoil, postes, cajones, muebles, ropas y raíces. En la Cuarta Sección, las calles coronel Díaz, Montecaseros e Ituzaingó se habían convertido en verdaderos ríos, mientras Las Heras vivía horas de angustia, especialmente en los barrios Independencia y Espejo.

El aluvión tuvo repercusión internacional, la lista de 21 de víctimas fatales (19 en el Gran Mendoza, uno de San Martín y otra de San Rafael) y de pérdidas económicas fue impensable. El presidente Juan Carlos Onganía viajó a Mendoza para interiorizarse de la situación y se reunió con el gobernador José Eugenio Blanco, mientras desde Chile llegó ayuda por vía aérea.

"Fue un accidente en una obra programada en la década del 30 y construida en la del 40, con las previsiones que había dado el estudio de años anteriores. Pero la naturaleza muchas veces es imprevisible", señaló ayer el ingeniero Carlos Segerer, jefe técnico a cargo del despacho de la Dirección de Hidráulica.

Aseguró que en ese tipo de obras se trabaja de acuerdo con las estadísticas, y "a veces la naturaleza rompe esas estadísticas", poniendo como ejemplo que en Estados Unidos las estadísticas determinaban que en los últimos 100 años el mayor caudal de un río había llevado 1.000 metros cúbicos. "Se hicieron los puentes para contemplar 3.000 metros cúbicos, pero un día y por una tormenta el río llegó a los 25 mil metros, llevándose todo", destacó.

Aseguró que el dique Frías no estaba embancado y lo demostraron con fotografías aéreas tomadas dos meses antes del aluvión. "De haberlo estado, la Provincia habría perdido millones de pesos en juicios", dijo, para agregar que "la estadística marcaba una crecida máxima de 120 metros cúbicos por segundo y se previó el dique para esa cantidad. Pero como llovió durante tres días y las cuencas estaban colapsadas, ese día el caudal llegó a los 300 metros. El vertedero natural fue sobrepasado y la presa de tierra no aguantó. Ahora hemos previsto un aliviadero de 450 metros cúbicos, pero no sabemos si la naturaleza alguna vez puede llegar a hacer una mala jugada. En todo el mundo los ingenieros nunca dicen que jamás volverá a pasar, porque la que manda es la naturaleza".

Destacó finalmente que todos los diques que rodean a la ciudad, sus aliviaderos y los canales colectores y de derivación se encuentran absolutamente limpios de embanques, "porque es la única forma de prevenir". Francisco Orsini Ex secretario de redacción de Diario Los Andes

En **enero del 2005** las tormentas produjeron crecidas importantes causando 3 pérdidas humanas, 2 desaparecidos y daños materiales sobre viviendas, canales, rutas y calles. Durante tres días la circulación normal de la ciudad se vio fuertemente alterada. El servicio de dotación de riego se vio comprometido en varios sectores.

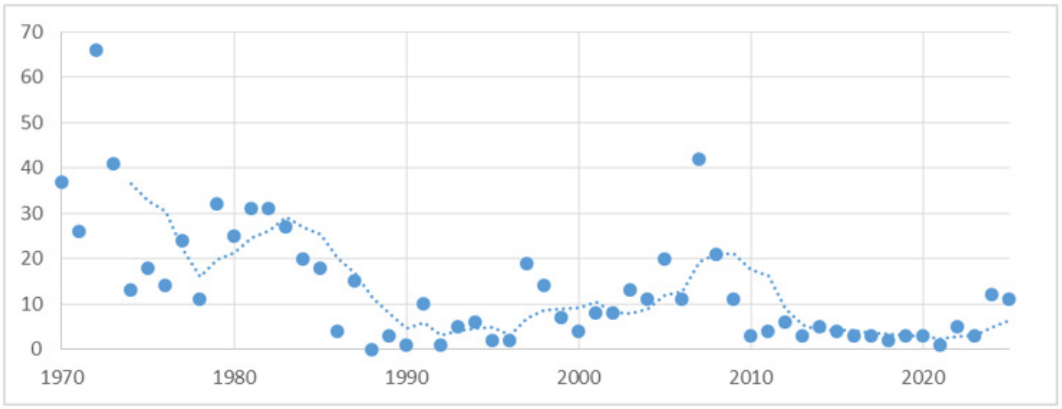
Según el Ing. Pedro Fernández (QEPD, ex director del INCYTH hoy INA): expresó lo siguiente al diario Los Andes:

1. La tormenta del lunes **14 febrero de 2007** no puede considerarse excepcional, pero sacó a la luz la necesidad de planificar el desarrollo urbano, el uso del suelo, proyectar desagües pluviales y mejorar el sistema de alerta hidrológica.
2. Antes de analizar este evento, conviene aclarar lo siguiente: **cuando en toda la zona descripta ocurren lluvias en las cuencas altas y medias, los diques de detención existentes o a construir y las medidas de corrección tiene efectos protectores positivos.**
3. Cuando las lluvias precipitan en zonas bajas, urbanas o rurales, obviamente esos diques o medidas de corrección no tienen ni pueden tener ninguna acción de protección.
4. De acuerdo a los registros de la red de monitoreo de estaciones telemétricas del INA, que cubre las sierras, el piedemonte y algunas áreas urbanas, la lluvia de ese día estuvo fundamentalmente centrada en la zona de Chacras de Coria, Maipú y otras localidades vecinas, de modo que las obras de protección de las cuencas altas no tuvieron intervención en forma directa.
5. Llovieron 85 mm en el Dique Cipolletti (74 en una hora), 51 mm en Chacras de Coria (Facultad de Cs. Agrarias, dato de la estación del SMN), 31mm en puesto Crucecita y 34 mm en el puesto el Peral. Si bien estas dos últimas son de las cuencas altas, sus escurrimientos fueron principalmente al río Mendoza. En todas las demás estaciones, no se registró lluvia.
6. Esa lluvia, **si bien importante no es algo nunca visto**, existen datos históricos de lluvia mayores (ejemplo la del 4 de enero de 1970 o la del 31 de diciembre de 1959) y desde el punto de vista estadístico, aun suponiendo que puedan haber habido lugares con 85 mm de lluvia en una hora (algo muy factible de acuerdo a las condiciones atmosféricas de esa tarde), la lluvia se enmarca para Mendoza, de acuerdo a la clasificación que usamos los hidrólogos, en "la tormenta" de los 25 años, o sea con una probabilidad anual de ocurrencia del 4 por ciento. Esta es una lluvia muy importante, pero **no se puede considerar excepcional**.

La revisión de la base de datos DesInventar (https://www.desinventar.org/) para el período 1970-2015 revela para la provincia de Mendoza un total de 686 registros de desastres hidrometeorológicos, representando el 71% de todos los desastres registrados. En total se contabilizan 108 muertes, equivalente a una tasa de mortalidad de 2,4 muertes por año.

Según la distribución por tipo de amenaza, se puede indicar que el 34% corresponde a eventos nivales (233 eventos),17% a inundaciones (117 eventos), 16% a tormentas (110 eventos), 3% a aluviones (21 eventos) y el restante 13% (88 eventos) a otros desastres hidrometeorológicos. Cuadro 11.5

Cuadro 11.5 **Evolución temporal de eventos de desastre hidrometeorológico (1970-2025).**



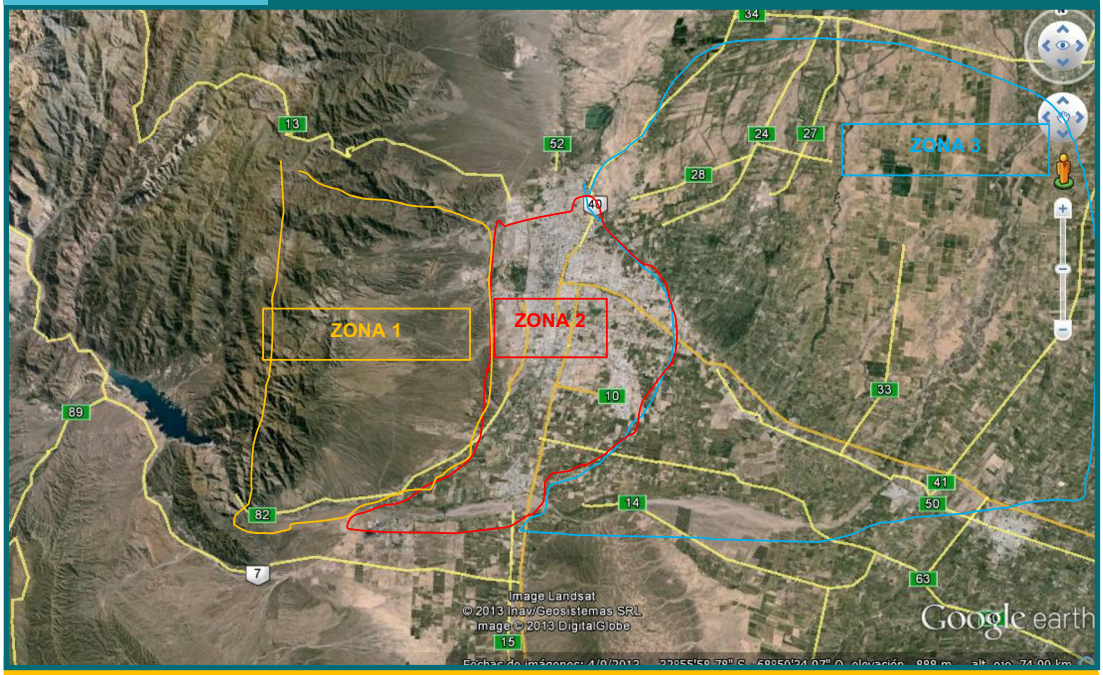
Fuente: DesInventar y registros de Burgos, V y Miranda, S (2025)

La recopilación complementaria para la última década (2015-2025) identifica 50 eventos adicionales, lo que representa un promedio de 5 eventos por año, aunque en los últimos dos años se hayan recopilado 11 eventos por año. El análisis del registro completo de 55 años indicaría una reducción en la cantidad de eventos, con una media anual de 13 eventos, pero se observa un aumento paulatino desde el año 2010. Este incremento puede reflejar tanto una mayor capacidad de registro y sistematización como la persistencia del riesgo hidrometeorológico en un contexto de mayor exposición territorial y variabilidad climática.

En resumen, esta recopilación histórica –aunque no son todos los eventos registrados– pone de manifiesto que los fenómenos aluvionales y de inundaciones no es exclusivo de la actualidad, se tienen registros desde el siglo XVIII, XIX y principalmente del siglo XX. A su vez, los procesos de urbanización del área metropolitana del gran Mendoza, si bien han respetado algunas líneas principales de escurrimientos, no han generado o sido acompañados, con todas las acciones estructurales de mitigación del riesgo hidrológico y actualizándose con los avances en materia hidrológica.

En la actualidad el desarrollo territorial del Gran Mendoza, presenta 3 zonas bien diferenciadas hidrológicamente, en las cuales cada tormenta genera diferentes efectos o consecuencias (Cuadro 11.6), para lo cual se debe analizar con criterios hidrológicos diferenciados:

Cuadro 11.6 Zonificaciones hidrológicas del Gran Mendoza



ZONA 1: HIDROLOGÍA ALUVIONAL

- √ zona histórica natural (rural)
- √ hoy zona de usos múltiples (urbano-turístico-basurales-ripieras)
- √ pendientes fuertes 2-8 %
- √ cauces naturales- colectores aluvionales – presas aluvionales

ZONA 2: HIDROLOGÍA URBANA: MACRO Y MICRODRENAJE

Cuadro 1 zona histórica de crecimiento urbano
Cuadro 2 zona histórica de riego arboleda
Cuadro 3 hoy zona netamente urbana
Cuadro 4 pendientes moderadas 0,5 – 1%
Cuadro 5 principales colectores aluvionales
Cuadro 6 pocos canales de riego
Cuadro 7 gran cantidad de acequias revestidas
Cuadro 8 calles canales pavimentadas

ZONA 3: HIDROLOGÍA URBANA Y RURAL. MICRODRENAJE

- √ zona histórica de riego arboledas y agrícola
- √ hoy zona de usos múltiples
- √ conflictos de usos
- √ pendientes bajas 0,1 – 0,5%
- √ canales de riego variados
- √ acequias variadas
- √ calles canales variadas
- √ napas freáticas altas
- √ suelos no tan aptos para construcciones

11.4 GESTIÓN DE INUNDACIONES EN MENDOZA

Lo expuesto en los capítulos anteriores se refleja en la gestión de las instituciones a lo largo de la historia. En Mendoza, la principal institución referente en estos temas aluvionales e inundaciones es la **Dirección de Hidráulica** (DH), hoy dependiente de la Subsecretaría de Ambiente.

Su creación en el año **1936** bajo Ley 1210 la designaba como **Dirección de Desagües y Obras Hidráulicas** de la provincia, dependiente del Ministerio de Industrias y Obras Públicas. Luego con la Ley 1451 el Departamento General de Irrigación, crea la **Sección Desagües** que funcionará bajo su control y dependencia, y que sustituirá en adelante a la Dirección de Desagües y Obras Hidráulicas de la Provincia, creada por la Ley N° 1210, teniendo esta Sección las mismas funciones determinadas en el Artículo 1o, incisos a), b), c) y d).

Posteriormente, se creó el **10 de enero de 1.961 por Ley 2797** la "Dirección de defensa contra aluviones" en el ámbito del Departamento General de Irrigación, en virtud de una serie de aluviones que venían azotando a distintas regiones de la provincia y no existía una institución que pudiera abordar esta problemática. En ese momento en el poder ejecutivo estaba el Ministerio de Economía, Obras Públicas y Riego y por lo que se reglamentó por Decreto 1.781/61.

Dentro de las primeras funciones se tiene:

- Art 1°: ... "jurisdicción sobre las **obras de defensa contra aluviones y los cauces aluvionales** existentes en terreno de dominio público o privado de la Provincia".

- Art 2°: ... "funciones: la realización de estudios, proyectos y obras destinadas al **encauzamiento de las aguas pluviales en defensa de las zonas rurales y urbanas de la Provincia** y la conservación y mejoramiento de las obras existentes.

En el año **1967** por Ley 3.308 pasa a la jurisdicción del Ministerio de Obras y Servicios Públicos, para finalmente denominarse, mediante Decreto 2.911/70, "Departamento de Defensa Aluvional "pero dependiente de la Dirección de Hidráulica, que también se le da un rol en la gestión de la presa embalses y centrales hidroeléctricas.

El artículo 192 de la Constitución de la Provincia reserva para el Poder Ejecutivo, la construcción de las grandes obras hidráulicas en el marco de sus ministerios de obras o infraestructuras...con la misión de **"Entender en la planificación, organización, dirección y control de estrategias, políticas y acciones relacionadas con la administración de la obra pública.... y el manejo de la obra hidráulica a fin de dotar a la comunidad de una infraestructura que sirva de herramienta para el desarrollo económico y social de la provincia".**

11.5 CONCLUSIONES

Mendoza tiene historia y mucho se ha escrito, estudiado, publicado sobre las crecidas en ríos permanentes por rotura de glaciares, crecidas nivales, crecidas pluviales, aludes y aluviones como así también en los sectores urbanos por las inundaciones debidas a crecidas pluviales y desborde de colectores aluvionales.

Las mayores consecuencias se tienen en el principal conglomerado de la provincia que es el Gran Mendoza, situación que se viene reflejando de igual manera en todas las regiones o municipios de la provincia principalmente en el Valle de Uco, San Rafael, Luján de Cuyo, Maipú, etc. porque se sigue desarrollando con los mismos principios que en el Gran Mendoza.

Sin embargo, Mendoza tiene una fuerte institucionalidad, leyes completas y planes de ordenamiento territorial provincial y municipales.

¿Entonces, cuál es el problema o son los problemas que hacen que no se pueda aplicar efectivamente la Gestión de Inundaciones o la Gestión del Riesgo Hídrico en la provincia de Mendoza en especial en el Gran Mendoza?

Si lo pensamos rápidamente y como ya se ha escrito, Mendoza creció desordenadamente, por más que nuestros antepasados hicieron lo mejor posible de ese entonces, por ejemplo Ing. Balloffet.

La gestión de inundaciones tiene 3 pilares institucionales fundamentales: La Dirección de Hidráulica, los Municipios, el Departamento General de Irrigación (DGI) y las Inspecciones de Cauce (IdC). Es fundamental que se establezcan los límites jurisdiccionales de las mismas y que las mismas tengan el mismo objetivo de Seguridad Hídrica con una gobernanza adecuada. Un ejemplo de esto es el Artículo 2 de la Ley 2797, donde la función de defensa urbana la tiene la Dirección de Hidráulica, cuando por autarquía de los municipios es su función; a su vez se tiene el Departamento General de Irrigación y las IdC, con su competencia en la construcción, operación y mantenimiento de las redes de riego primaria (DGI), secundaria y terciaria (IdC), que a su vez actúan como desagües pluviales ya en algunos casos aluvionales.

Es importante eliminar el mito que no se puede urbanizar el piedemonte, cuando en realidad el Gran Mendoza se desarrolló en el piedemonte, lo que hay materializar es un desarrollo es la zona 2 que está totalmente urbanizada pero aún más la zona 3, en donde las soluciones estructurales y las acciones antrópicas existentes son más complejas por resolver.

Mendoza, tiene que permitir el crecimiento poblacional, para ello, debe planificar cómo desarrollar las 3 zonas, si, aunque parezca impensado hasta en la zona 2 todavía hay por hacer aunque esté totalmente urbanizada, hay que invertir ideas y desarrollos que permitan mitigar el riesgo hidrológico.

A su vez, es probable que con el Cambio Climático (CC), nos enfrentemos a nuevos desafíos, en este sentido hay que normalizar lo existente y resolver lo que aún no está resuelto, que es la historia reciente, para poder entender el futuro próximo.

Hay que evitar ser alarmistas con los milímetros caídos y generar conocimiento hidrológico real en la población y en función de la zona donde vive. En este sentido si hay que utilizar los Sistemas de Alertas como el del INA en el piedemonte del Gran Mendoza, para procesar e interpretar esa información, en lo posible ampliar esa red a otras zonas del Gran Mendoza y de Mendoza mismo.

Lo más importante, es que estamos en el siglo XXI, y todo lo anterior no se puede materializar si no se aplica Hidrología formal e integral, de manera de tener actualizadas las curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia) como así también las PMP (Precipitación Máxima Probable) por zonas, con planos y mapas de inundación en las 3 zonas, para todos los municipios e integrados a los planes de ordenamiento.

La hidrología aplicada a inundaciones es diferente para zonas rurales, urbanas, de montaña o nivales, de remoción de masas o aludes, por ende, es necesario que sea aplicado por actores formados en estos temas.

Es imperioso que las instituciones se capaciten en hidrología y que generen los instrumentos necesarios: Normas o Reglamentos y Ordenanzas para que los desarrolladores públicos y privados cumplan con esos requerimientos.

Todo lo expuesto está consolidado en el Plan Hídrico de Mendoza 2026, en su Resultado 3: Gestión del Riesgo Hídrico, y aún más en el desarrollo de los Planes de Cuencas a realizar. Por tal motivo, es fundamental que las instituciones se involucren y participen activamente en el mencionado Plan.

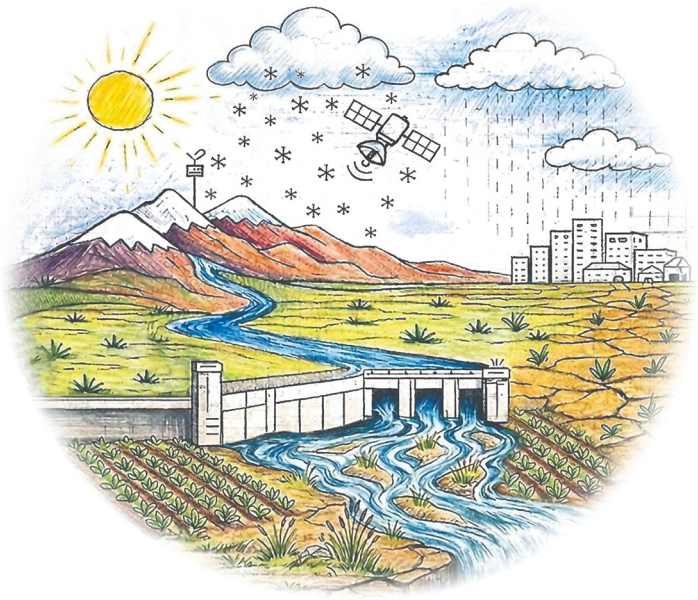
11.6 BIBLIOGRAFÍA

Diario Los Andes (1934). Una extraordinaria creciente ha interrumpido toda comunicación entre Mendoza y Chile. Diario Los Andes.

Municipalidad de la Ciudad de Mendoza (2023, Noviembre 15). A 160 años de la confección del plano que concretó el diseño de la Ciudad de Mendoza. Portal de la Ciudad de Mendoza. https://prensa.ciudaddemendoza.gob.ar/2023/11/15/a-160-anos-de-la-confeccion-del-plano-que-concreto-el-diseno-de-la-ciudad-de-mendoza/

Ponte, J. (2006). De los caciques del agua a la Mendoza de las acequias. Ediciones Ciudad y Territorio INCIHUSA-CONICET.

Silanes, R. Breve historia de las inundaciones en Mendoza. Texto inédito, sin publicar.



Ante la sequía recurrente y el cambio climático, esta obra fundamenta la transición hacia una gestión proactiva del riesgo hídrico en Mendoza. Integra la hidrología nival y el modelado hidrológico con los marcos jurídico-institucionales del agua. Destaca innovaciones digitales tanto para el monitoreo y alerta temprana, como para la planificación y seguimiento de la distribución de dotaciones. Al abordar la distribución, la gestión de inundaciones y la gobernanza participativa y preventiva, se consolida como una herramienta estratégica para alcanzar la seguridad hídrica regional.

Autores

Rubén Villodas
Juan A. Rivera
Ignasi Servià Goixart
Rodrigo Villarreal
Carlos Martini
Ezequiel Toum
Héctor Abel Segal
Mauricio Pinto
M. Marcela Andino
Matías Roselló
Marcelo Alejandro Toledo

Esta publicación cuenta con el aval académico de
la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo

IRRIGACIÓN
Agua que da vida

IRRIGACIÓN
edita

UNCUYO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE INGENIERÍA

ISBN 978-987-23642-8-1