Licenciatura en Economía

Análisis de eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales en Mendoza durante el período 2010-2021

Autor

Ayende Muñoz, Marcos Fabián

Registro: 31091

marcos.ayende@fce.uncu.edu.ar

Profesora tutora

Lic. Mónica Iris Calderón

Co-director

Phd. Félix Sebastián Riera

Mendoza, 2023

Resumen técnico

El objetivo de la investigación es determinar la eficiencia de las plantas de tratamiento de Mendoza durante el período 2010-2021. Surge la necesidad de aplicar técnicas econométricas para alcanzar una estimación adecuada de eficiencia, desde modelos paramétricos hasta no paramétricos. El tipo de abordaje metodológico es cuantitativo; siendo el carácter principal de esta tesis, el explicativo. Sin embargo, no se pasa por alto el análisis descriptivo de las variables cualitativas que representan el estado actual de las plantas de tratamiento. Para el armado de la base de datos primarios se realizaron simulaciones en el software "Poseidón", teniendo como insumo, datos secundarios provenientes de diversas fuentes, AySAM, EPRE, entre otras. Para el análisis econométrico se tomaron modelos de *"Stochastic Frontier Analysis"* para datos de panel, tomando en cuenta el impacto del paso del tiempo en la eficiencia, además del modelo no paramétrico *"Data Envelopment Analysis"*. Evaluando cada uno de estos modelos en base a criterios estadísticos. Se pone el foco en las variables dependientes, su relación con la variable endógena, sobre todo con los niveles de eficiencia. Estas variables van desde milímetros cúbicos de agua tratada al año, costos anualizados de capital hasta la cantidad de energía empleada por cada planta durante el período de análisis. Para concluir, se menciona cuál de las tecnologías utilizadas actualmente resulta ser la más eficiente y de mayor escalabilidad.

Palabras clave: EFICIENCIA TÉCNICA, PLANTAS DE TRATAMIENTO, AGUA RESIDUAL

Contenido

Introducción ... 4
Capítulo 1 ... 5
Antecedentes ... 5
Problema de investigación ... 7
Hipótesis ... 9
Estrategia metodológica ... 9
Marco teórico ... 10
SFA ... 12
SFA Panel Data ... 15
DEA ... 16
Capítulo 2 ... 19
Plantas de Tratamiento Mendoza ... 19
Paramillo ... 21
Campo Espejo ... 21
Tunuyán ... 22
San Rafael ... 23
San Martín, Palmira y Junín ... 24
Capítulo 3 ... 25
Tecnologías y Tipos de Tratamiento ... 25
Capítulo 4 ... 29
Dificultades para la obtención de datos ... 29
Software Poseidón ... 29
Simulaciones ... 30
Capítulo 5 ... 34
Variables ... 34
Estimaciones SFA ... 38
Cobb-Douglas ... 38
DEA ... 41
Conclusiones ... 43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ... 45

Introducción

El estudio de la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales es de gran importancia por varias razones. En primer lugar, el agua es un recurso limitado, esencial para la vida y el desarrollo humano. A medida que la población mundial continúa creciendo, la urbanización se intensifica, la demanda de agua limpia y potable aumenta significativamente, lo que hace que sea cada vez más importante asegurar que se utilice de manera eficiente y se trate adecuadamente antes de ser liberada de nuevo al medio ambiente.

En segundo lugar, las aguas residuales pueden contener una variedad de contaminantes que pueden ser perjudiciales tanto para la salud humana, como para el medio ambiente si no se eliminan adecuadamente. Estos contaminantes incluyen bacterias, virus, productos químicos, nutrientes y sólidos suspendidos, entre otros. Si las plantas de tratamiento no funcionan de manera eficiente, pueden liberar aguas de rehúso mal tratada al medio ambiente, lo que puede provocar problemas de salud pública, contaminación del agua y degradación del ecosistema.

En tercer lugar, tal como lo describen Strande et al., (2014), ‘‘el estudio de la eficiencia de las PTARs[1] también puede ayudar a identificar oportunidades para mejorar el rendimiento y reducir los costos operativos” (p. 5). Esto puede ser especialmente importante en países en desarrollo donde el acceso a tecnologías avanzadas, como los recursos financieros pueden ser limitados. Al mejorar la eficiencia de las plantas de tratamiento existentes, es posible reducir la cantidad de agua y energía necesarias para realizar el tratamiento, lo que a su vez puede reducir los costos de operación, mantenimiento, mejorando la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura.

Por lo tanto, el estudio de la eficiencia de las PTAR es esencial para garantizar el acceso a agua limpia, segura para las personas, reduciendo el impacto negativo de las aguas residuales en el medio ambiente, mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la infraestructura.

Para presentar el estudio de las PTARS el trabajo se encuentra organizado en 5 capítulos, comenzando por el marco teórico, descripción de las plantas y la tecnología de tratamiento y finalizando por la presentación de los resultados de los modelos SFA y DEA.

[1] Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Capítulo 1

Antecedentes

En los últimos años, la tecnología empleada en Mendoza no se ha visto modificada de forma importante, por tanto, en este escenario toma mayor relevancia la optimización de los recursos para poder evaluar si es conveniente seguir por el mismo sendero o cambiar a nuevos procesos de tratamiento. Actualmente, la tecnología más empleada en la provincia son las lagunas facultativas, las que si bien presentan bajos costos de inversión debido al extenso territorio con el que cuenta Mendoza, es de las tecnologías más arcaicas, por ende, no la más eficiente, además tiene poca facilidad de aumentar su capacidad. A su vez es de las que mayores externalidades negativas tiene en cuanto a los terrenos aledaños a las plantas.

En este sentido, se han desarrollado diversas metodologías y enfoques para analizar la eficiencia en las PTAR, con el fin de identificar las mejores prácticas, optimizando el uso de los recursos. La literatura existente ofrece diversas herramientas para el análisis de eficiencia, la mayoría de estas surgen de las limitaciones en cuanto a la calidad y cantidad de los datos.

Wen y Lee (1997) llevaron a cabo una regresión difusa en su trabajo titulado "Development of a cost function for wastewater treatment systems with fuzzy regression[2]"; los autores decidieron emplear este método debido a que los datos de entrada del modelo eran "difusos", es decir que presentaban cierta incertidumbre. Uno de los contrastes más claros entre el margen de error y viabilidad de modelos se presenta con el trabajo de Hernández-Sancho y Sala-Garrido (2009) quienes aplicaron el análisis envolvente de datos (DEA) para medir la eficiencia técnica y el costo de 15 PTAR en España.

Si bien las regresiones difusas permiten dar una aproximación incluso ante la incertidumbre de los datos, estas presentan grandes limitaciones al momento de evaluar soluciones, ya que los parámetros también son difusos. Por otra parte, la metodología empleada por los autores españoles busca determinar qué unidades o decisiones son más eficientes en términos de producir la máxima salida con la mínima entrada, esto representa un mayor grado de complejidad en cuanto a cómo se recolectan los datos y/o la confiabilidad de su fuente. A priori se podría pensar que la segunda alternativa es mejor, pero tal como lo describen los autores, "no se alcanzó una gran

[2] Método econométrico que debe su nombre debido a la incertidumbre en sus datos.

precisión en cuanto a los parámetros y tampoco un elevado R^2" (Hernández-Sancho y Sala-Garrido, 2009, p. 2)

Hernández-Sancho, Molinos-Senante y Sala-Garrido (2011) toman la decisión de retomar el típico análisis de regresión lineal, pero cambian tanto las variables explicadas como las explicativas. En el caso de las primeras pasan de usar la cantidad de agua tratada, como en las investigaciones mencionadas anteriormente, a emplear los costos totales de las PTAR, lo que implica que la ineficiencia se tendría que ver reflejada en mayores costos en lugar de reducciones en la "producción" (entendiendo por producción a la cantidad de "wastewater" tratada). Por el lado de las variables explicativas, pasan de factores productivos a la calidad en la remoción de agentes bacteriológicos, lo cual, lógicamente es el objetivo último del por qué se les realiza tratamiento a las aguas residuales. A diferencia del trabajo presentado en el 2009, los autores consiguieron mejores resultados y un mejor ajuste, pero esta precisión viene acompañada de un mayor costo en cuanto a la recolección de datos debido a los constantes informes químicos que son necesarios.

Nuevamente, Molino-Senante y Maziotis (2021) aplicaron un análisis de crecimiento de la productividad (CPG) para analizar la eficiencia productiva, las economías de escala, como el alcance en la industria de agua y alcantarillado en Chile. La pregunta a esta altura es por qué cambiar la forma de análisis y esto se debe a que GPC se utiliza para descomponer el cambio en la productividad en tres componentes principales: cambios en la eficiencia, cambios en la intensidad del uso de factores y cambios en la tecnología, un tipo descomposición que no se había tomado en cuenta hasta el momento.

Los primeros trabajos permitían entender si la planta de tratamiento era o no eficiente, pero no diferenciar qué factores la afectaban más o menos. Pero como todo análisis econométrico, este no es perfecto, al igual que para el trabajo de Hernández-Sancho, Molinos-Senante y Sala-Garrido (2011) se necesitan una gran cantidad de datos y no deberían tener incertidumbre sobre estos, además el análisis para Mendoza se complica ya que esta técnica supone que la tecnología mejora con el tiempo.

En cuanto a Mendoza, la realidad resulta más compleja, a diferencia de los estudios mencionados, no solo no se encuentra la información incompleta, sino que la calidad de la misma se ha visto perdida debido a cambios en las políticas y regulaciones de la Departamento General de Irrigación (DGI) y la empresa público-privada Aguas y Saneamiento Mendoza Sociedad Anónima (AySAM)[3]. Por esto, los datos se han simulado a partir del software "Poseidón". Bajo este contexto

[3] En adelante DGI

lo lógico sería aplicar un análisis de regresión difusa pero como se mencionó, tendría poca utilidad para poder proponer mejoras. Claro está que los análisis más complejos como DEA y GCP se encuentran fuera de alcance, y lo propuesto por Hernández-Sancho et al (2011) no es posible ya que "Poseidón" no permite obtener información respecto a la calidad del agua. A raíz de esto, en la presente tesis se analiza la eficiencia en base a la metodología de eficiencia, a determinar si el enfoque paramétrico o determinístico para datos de panel propuesto por Battese y Coelli (1995) el cual permite trabajar con una menor cantidad de observaciones y diferenciar las ineficiencias sistemáticas de las aleatorias, además, a diferencia de GCP este método permite evaluar si la tecnología mejoró o empeoró a lo largo del tiempo.

Problema de investigación

El tratamiento de aguas residuales es un tema de gran importancia en todo el mundo. En Argentina, específicamente en la provincia de Mendoza, el tratamiento de aguas residuales ha sido un tema de constante discusión y preocupación. El crecimiento de la población y el desarrollo económico han llevado a un aumento en la generación de aguas residuales, por ende, a la necesidad de plantas de tratamiento eficientes.

A pesar de los esfuerzos realizados por el gobierno y el sector privado para mejorar la infraestructura de tratamiento de aguas residuales en la provincia, aún existen desafíos importantes en cuanto a la eficiencia y calidad de estas plantas. La falta de monitoreo y control adecuados, la obsolescencia de la tecnología y la falta de inversión son algunos de los factores que contribuyen a la problemática. Por lo tanto, la investigación del análisis de eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales en Mendoza es crucial para mejorar la calidad de vida de la población, el medio ambiente y la economía de la región.

La pregunta problema que se busca responder es: ¿Cómo es la evolución de la eficiencia de las PTARs y cómo incide en la asignación de recursos de AySAM[1], de 2010 a 2021? El objetivo general es analizar la evolución de la eficiencia de las PTARs y su incidencia en la asignación de recursos de AySAM, de 2010 a 2021.

De esta problemática surgen dos preguntas específicas, la primera es: ¿Cuál es el nivel de eficiencia de las PTARs a partir de las metodologías econométricas para período 2010 a 2021 debido a los datos simulados y cualitativos que se tienen? Se busca determinar el nivel de eficiencia de las PTARs para el período 2010 a 2021 a partir de la información disponible y simulada.

El uso de determinadas metodologías en particular surge debido a la evolución y sofisticación que ha tenido la Econometría en cuanto a la estimación de eficiencia durante los últimos años, como describe Farrell, M. J. (1957), determinar la alternativa de análisis que permite obtener un cálculo más preciso de cada variable involucrada.

La segunda pregunta se refiere a ¿Cuáles de las variables seleccionadas tienen efecto en el desempeño de las plantas generando desviaciones dentro sus posibilidades de producción y determinar si son sistemáticas o por shocks aleatorios? El objetivo es determinar las causas de eficiencia/ineficiencia mediante los coeficientes de las variables involucradas, mediante el termino error determinar si esta eficiencia/ineficiencia es sistemática o aleatoria.

En términos teóricos, la investigación apunta a comprender los efectos de la asignación de recursos dentro de una empresa público-privada. Sumado a las restricciones de incorporación de mano de obra y manejo de los recursos materiales. Esta información correctamente modelada permitirá comprender los efectos de las políticas sectoriales y mejorar la evidencia sobre sus implicancias.

Definir los porqués de la ineficiencia (eficiencia) de las PTARS va a contribuir a que se mejore el bienestar de la sociedad, pero no solo en el presente sino también en las generaciones futuras. Ya que, estos van a tener la posibilidad de hacer uso de una mayor cantidad de recursos tanto desde el aspecto fiscal, como de la tierra, agua de reuso, y por supuesto agua potable.

Sin pecar de ser redundante, el acceso a los datos es complicado, sin embargo, a partir del software *Poseidón*, es posible obtener estimaciones de costos y cantidades de factores necesarios para llevar a cabo los modelos econométricos ya mencionados. Además, se cuenta con esta información adicional, debido a las visitas de campo en la cuales se ha registrado información cualitativa de 12 de las plantas con las que cuenta AySAM, visitas que han sido enmarcadas en el proyecto que se encuentra actualmente en desarrollo *"Economía Circular y Transición Energética en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales"* siendo el director y codirector, Alejando Gennari y Sebastián Riera, respectivamente.

Hipótesis

A continuación, se presenta la hipótesis correspondiente a cada pregunta de investigación. Para ello, se recuerdan preguntas de investigación específicas previamente formuladas.

La primera pregunta específica es: ¿Cuál es el nivel de eficiencia de las PTARs a partir de las metodologías econométricas para período 2010 a 2021 debido a los datos simulados y cualitativos que se tienen? La hipótesis correspondiente es:

H1: En base a los datos simulados y cualitativos que se tienen sobre las PTARS de Mendoza durante el período de 2010 2021 se espera un nivel de eficiencia por debajo del 80%.

La segunda pregunta específica es: ¿Cuáles de las variables seleccionadas han tenido más impacto en la producción de agua tratada? La hipótesis correspondiente es:

H2: Las variables que más impacto han tenido son: kwh, trabajo empleado, capital.

Estrategia metodológica

La presente investigación emplea un enfoque cuantitativo con el objetivo de poder determinar (en caso de ser posible) las causas de la eficiencia/ineficiencia de las PTARS de Mendoza durante el período 2010-2021.

Este enfoque seleccionado se ve reflejado mediante el uso de métodos econométricos los cuales permiten definir si existe relación o no, entre las variables en cuestión. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos específicos es determinar cuál es la mejor metodología para la unidad de análisis sobre la cual se lleva a cabo la investigación.

Se seleccionan las plantas de tratamiento de Mendoza debido a la posibilidad de acceso a la información, debido a que esta Tesis se encuentra enmarcada dentro del proyecto *"Economía Circular y Transición Energética en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales"*, agradeciendo al director y Codirector, el acceso a las bases de datos.

Se empezará describiendo los datos secundarios, ya que los primarios se valen de estos para simularse. Siendo el volumen de agua tratada el principal dato secundario, información provista por AySAM. Esta información se encuentra en formato de datos de panel, ya que se encuentra diferenciada por año y por planta de tratamiento, la cual es recolectada a partir de instrumentos que miden la cantidad agua de entrada y salida de las plantas.

Los otros dos datos son:

Precio del kWh, el cual es publicado por el EPRE a medida que realiza actualizaciones de las tarifas. Para el caso particular de los que nos compete, se optó por tomar el último cuadro tarifario de cada año.

Precio de la mano de obra que, debido a las dificultades para obtener una base de datos consistente, se decidió por trabajar con el salario promedio en dólares entre todas las categorías de trabajadores para el año 2021;

Entre los datos secundarios cuantitativos se encuentra la calidad del agua, información que se obtuvo por medio de AySAM, ya que estos se recolectan a través de estudios periódicos.

A través de las visitas a las plantas de tratamiento de aguas se logró detallar los procesos tecnológicos de cada PTAR. Los parámetros necesarios para determinar la cantidad de energía necesaria y los trabajadores se obtienen mediante la estimación de una regresión log-log. (Oertlé. E et al, 2019).

Para llevar a cabo cada una de las simulaciones se cargan los datos secundarios en el software *Poseidón* (explicado en el Capítulo 4) y como *output* se obtuvo: el costo de energía, costo de la mano de obra, costo de capital, cantidad de horas trabajadas, cantidad de kWh empleados y costos por metro cúbico (m^3). Cada uno de estos de forma anual y para cada una de las plantas de tratamiento.

Marco teórico

El presente estudio sigue el paradigma pospositivista con el fin de mirar la realidad económica actual en la que se encuentran inmersas las PTARS mendocinas, la cual se analizará de acuerdo a las diferentes teorías que existen para tratar de explicar y analizar su eficiencia. El objetivo es dar cuenta de este tema, el cual ha sido aprendido de diversas teorías, estadísticas y estudios previos.

Se busca establecer una relación entre las variables de caudal, metros cúbicos anuales (m^3/año) tratados y la cantidad de factores empleados, para medir de forma estadística como el uso de estos y sus interrelaciones afectan la eficiencia de las PTARs.

La investigación se centra principalmente en aspectos cuantitativos, donde los datos provienen tanto de entrevistas realizas a empleados de AySAM, informes de entidades internacionales (por ejemplo, ADERASA[4]) y de simulaciones provistas por el software *Poseidón* desarrollado por Oertlé, E., Hugi, C., Wintgens, T., & Karavitis, C. (2019). En post de lograr una mayor contextualización de las PTARS, también se incluye información cualitativa como: el estado de las plantas, calidad del terreno, zonas aledañas, que como ya se mencionó en el apartado anterior, estos datos fueron relevados en visitas a las plantas de tratamiento.

Para esta investigación, procurando que exista coherencia con el paradigma pospositivista seleccionado, la teoría general que subyace es el individualismo metodológico. Según (Sautu, 2010), "las investigaciones realizadas a partir del esquema del individualismo metodológico postulan que la estructura social puede ser reconstruida a partir de las características de las unidades individuales que la conforman" (p. 53).

Al relacionar lo anterior con lo que compete a esta investigación, tal como dice Baumol, (1977) "La eficiencia económica se alcanza cuando se utiliza el mínimo de recursos para producir la cantidad adecuada de bienes y servicios que la sociedad necesita" (p, 43), por ende si no se emplean trabajo y capital de la forma apropiada es imposible que se puedan satisfacer de forma adecuada las necesidades de la sociedad, ya que se estaría haciendo mal uso de factores los que podrían ser empleados en otras actividades, esto condice con lo planteado por (Farrel, 1957) "La ineficiencia económica puede llevar a la producción excesiva o insuficiente de ciertos productos, lo que a su vez puede provocar una pérdida de bienestar en la sociedad" (p, 20). Por ende, es de suma relevancia indicar qué acciones y hechos afectan a la eficiencia de las PTARS.

¿Pero qué es la eficiencia económica? Farrell, (1957) define la eficiencia técnica como la capacidad de una empresa para producir la máxima cantidad de producción dada una cantidad específica de insumos; mientras que la eficiencia económica se refiere a la capacidad de la empresa para producir la cantidad óptima de producción dada la combinación de precios de los insumos y el producto final. En otras palabras, la eficiencia técnica se centra en la producción en sí misma, mientras que la eficiencia económica se centra en el resultado final, que incluye los precios, los costos de los insumos y productos. En resumen, la eficiencia técnica se enfoca en la producción, mientras que la eficiencia económica se enfoca en la rentabilidad y la competitividad.

[4] Asociación de Entes Reguladores de Agua Potable y Saneamiento de las Américas

Para el caso de AySAM (empresa que licita la provisión de agua y saneamiento) la eficiencia económica se plasma desde el momento de licitación, por lo cual, tener claro cuáles son las mejores políticas y tecnologías desde el principio le permite tanto a la empresa como al Estado la maximización de sus resultados.

¿Qué tipo de mercado es el de la provisión de agua y saneamiento? Como la mayoría de los servicios públicos, la provisión de agua y saneamiento es un monopolio natural, el cual se puede definir como aquella situación donde una sola empresa debido a su estructura de costos puede satisfacer el mercado de forma más eficiente que con varias empresas compitiendo Bailey, E. & Baumol, W. (1989).

Debido a las particularidades mencionadas de este mercado, los gobiernos regulan cómo se prestan los servicios ya que buscan que la sociedad maximice su bienestar. Un ejemplo de estas regulaciones es que, estas pueden fijar un precio máximo al cual puede proveerse el servicio o directamente fijándolo en el CMe[5], como es en el caso de Mendoza (por normativa de DGI). Otras alternativas posibles pueden ser: regulación de cantidades, regulación de calidad, competencia limitada. Tirole, J. (1988).

El análisis que se lleva a cabo en este trabajo es sobre ambas eficiencias, pero dado que es condición necesaria (no suficiente) la existencia de eficiencia técnica para que se de la eficiencia económica, el foco de análisis se pone en la primera de estas por medio de los siguientes modelos econométricos.

Análisis de Fronteras Estocásticas (SFA)

En castellano, Análisis de Fronteras Estocásticas (SFA por sus siglas en inglés), este método busca estimar la eficiencia técnica y la ineficiencia de las unidades productivas, fue desarrollado por Aigner et al. (1977). Tiene la particularidad que diferencia el término error en dos partes, una que se refiere a lo que se podría llamar “ineficiencia sistemática”, la otra parte, es el error completamente aleatorio.

[5] Costo medio

Tal como describe C. Kumbhakar et al. (2017). SFA es un enfoque entre dos suposiciones extremas, por un lado, la inexistencia de ineficiencia por parte de la empresa (en este caso PTAR) como el caso clásico y el otro extremo donde se asume que todo desvío es respecto a la frontera de producción y nada se debe a desvíos aleatorios. Pero también abarca casos especiales, que aún se pueden seguir si los datos y las pruebas estadísticas de SFA no rechazan la hipótesis de eficiencia total, entonces se puede proceder con las técnicas de regresión estándar. No considerar la posible ineficiencia podría ser crítico tanto para conclusiones cuantitativas como cualitativas, y quizás más importante aún, para las implicaciones políticas resultantes. Resulta importante recalcar que por el momento el modelo al cual se hace referencia es de corte transversal, por esto mismo el subíndice es i.

Usando la notación convencional, el modelo define de la siguiente forma:

$$y_i = m(x_i;\beta) - \ \mu_i + v_i = m(x_i;\beta) + \epsilon_i$$

Dónde $m(x_i;\beta)$: Frontera de producción. Siendo x_i el vector de inputs y β los parámetros asociados. Podemos observar que la principal diferencia con un modelo de regresión convencional es que el termino error (ϵ_i) se encuentra separado en dos componentes, μ_i y v_i respectivamente. El primero de estos captura la disminución respecto al máximo dictado por la tecnología de producción, mientras que el segundo incorpora los shocks estocásticos.

Estas pérdidas de eficiencia (μ_i) pueden deberse a un uso sub óptimo de los inputs, bajos niveles de esfuerzo por parte de los trabajadores, información asimétrica entre las empresas (plantas). (C. Kumbhakar et al., 2017)

La aplicación del modelo SFA implica una serie de supuestos:

- Independencia entre u_i, v_i y x $\forall x$.
- μ_i tiene una distribución unidireccional, esto implica $E(\epsilon_i|x) \neq 0$. En forma sintética, esto asegura que las conclusiones el estudio son descriptivas, es decir que solo informan la presencia o ausencia de ineficiencia.

  Para realizar la estimación mediante MCO[6] SFA se puede reescribir como:

$$y_i = m(x_i;\beta) - \ \mu_u - (\mu_i + \mu_u) + v_i = m^*(x_i;\beta) + \epsilon_i^*$$

[6] Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Normalmente el foco del modelo SFA se pone sobre cada Unidad de Medida de Desempeño7 y en la tecnología de producción.

- $v_i \sim_{ii} N\ (0, \sigma_v^2)$
- $\mu_i \sim_{ii} N_+\ (0, \sigma_u^2)$
- A partir de las distribuciones anteriores se puede obtener una forma cerrada para la distribución de ϵ_i.

  $f(\epsilon) = \frac{2}{\sigma}\phi\left(\frac{\epsilon}{\sigma}\right)\Phi\left(-\frac{\epsilon\lambda}{\sigma}\right)$

  Donde:

  $\Phi(.)$ Distribución Normal Estándar Acumulativa

  $\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$

  $\lambda = \frac{\sigma_u}{\sigma_v}$ Proporción del cambio de ϵ debido a la ineficiencia.

La estimación de SFA se lleva cabo mediante el estimador de máxima verosimilitud (MLE, por sus siglas en inglés), siendo asintóticamente eficiente.

Existe una serie de alternativas de especificación para las distribuciones, pero dado los objetivos de este trabajo no se van a abordar, salvo por la distribución *Normal Truncada* para la μ_i que permite incorporar una mayor generalización al modelo SFA. Esto debido a que puede ser de utilidad para mejorar las estimaciones que se presentan en el C*apítulo 6.*

Distribución Normal Truncada:

$$f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma_u}\right)} e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma_u^2}} \quad , u \geq 0$$

Por lo tanto, la distribución de ϵ termina siendo la siguiente.

$$f(\epsilon) = \frac{\frac{1}{\sigma}\phi\left(\frac{\epsilon+\mu}{\sigma}\right)\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma\lambda}-\frac{\epsilon\lambda}{\sigma}\right)}{\phi\left(\frac{\mu}{\sigma_u}\right)}$$

[7] De ahora en adelante DMU.

SFA con datos de panel

"La ventaja de los datos de panel es que se puede analizar más información sobre la ineficiencia y la productividad, y en particular, arrojar luz sobre los cambios en la eficiencia o la productividad, lo cual difiere de un entorno de sección transversal, que solo puede proporcionar una representación estática de la ineficiencia". (C. Kumbhakar et al., 2017, p.47)

Trabajar con panales de datos soluciona una serie de problemas que tienen los modelos de corte transversal, pero implica una seria de supuesto adicionales. En términos matemáticos se define de forma muy similar al ya antes presentado, donde el subíndice i indica el individuo (planta de tratamiento) y el subíndice t el tiempo.

$$y_{it} = m(x_{it};\beta) + c_{it} - \eta_i + v_{it} - u_{it} = m(x_{it};\beta) + \alpha_i + \epsilon_{it}$$

$$\alpha_i = c_i + \eta_i$$

$$\epsilon_{it} = v_{it} - u_{it}$$

Donde:

c_i captura la heterogeneidad invariante en el tiempo y η_i la eficiencia invariante en el tiempo.

u_{it} representa la variación en el tiempo de la ineficiencia.

Tomando lo que se explica en Henningsen, A. (2019), se van a aplicar los siguientes cuatro modelos los cuales tienen en común el supuesto de que todos los individuos (plantas de tratamiento) tienen la misma frontera de producción.

1- Eficiencias individuales invariantes en el tiempo, es decir que $u_{it} = u_i$
2- Eficiencias individuales cambiantes en el tiempo, por lo que $u_{it} = u_t \exp(-\eta(t - T))$
3- Independencia en la estimación de la eficiencia de cada planta de tratamiento, ignorando la estructura de datos de panel.
4- Diferente Frontera de Producción para cada planta de tratamiento.

Análisis envolvente de datos (DEA)

Análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) es una técnica no paramétrica utilizada para medir la eficiencia relativa de un conjunto de unidades, que pueden ser empresas, organizaciones gubernamentales, hospitales, escuelas, etc.; que transforman entradas (inputs) en salidas (outputs). El DEA compara las unidades en función de su capacidad para transformar los inputs en outputs, identificando las unidades más eficientes y las ineficientes, y proporcionando información sobre cómo las unidades ineficientes pueden mejorar su rendimiento. Esta técnica fue desarrollada por Abraham Charnes, William W. Cooper y Edwardo Rhodes en su trabajo "Measuring the efficiency of decision making units" presentado el *European Journal of Operational Research* en 1978.

El objetivo de DEA es abordar el problema de eficiencia en unidades de toma de decisiones (DMUs[8])

Para el caso de dos empresas con un input y un output el modelo se puede definir de la siguiente manera.

A, B empresas

La producción media de las firmas se define como:

$AP(A) = \frac{y_A}{x_A}$ para la firma A

$AP(B) = \frac{y_B}{x_B}$ para la firma B

El índice de productividad relativa entre A y B se mide de la siguiente manera

$$\prod_{A,B} = \frac{AP_A}{AP_B} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_B}{x_B}}$$

Como la lógica indica, si el resultado anterior es mayor a 1 implica que la firma A es más productiva que la B (en términos relativos). Por lo que se calcula la eficiencia de la empresa en relación a lo máximo que podría producir.

Definiendo una tecnología de producción se puede definir lo que se llama *output-oriented* medida de eficiencia

[8] Por sus siglas en inglés, *Decision Making Units*

$TE_O^A = \frac{y_A}{y_A^*} = \frac{\frac{y_A}{x_A}}{\frac{y_A^*}{x_A}} \leq 1$ donde y_A^* representa el máximo output que se podría alcanzar

Esto mismo se realiza para la firma *B.* Si en cambio se orienta la eficiencia técnica con respecto al input (*input-oriented technical efficency)* la expresión anterior cambia a la siguiente.

$TE_1^A = \frac{x_A^*}{x_A} \leq 1$ lo mismo para *B.*

La eficiencia relativa se termina calculando mediante la ecuación:

$$\prod\nolimits_{A,B} = \frac{AP_A}{AP_B} = \frac{TE_0^A}{TE_0^B} = \frac{TE_1^A}{TE_1^B}$$

Definida la lógica que existe detrás del modelo se presenta a continuación el proceso de optimización mediante programación lineal necesario para alcanzar las estimaciones de eficiencia del conjunto de firmas. Este se encuentra definido para múltiples outputs e inputs.

Suponiendo un total de *N* empresas que producen *m* outputs a partir de *n* inputs, para la firma *t* los vectores son.

- $y^t = (y_{1t}, \dots, y_{mt})$
- $x^t = (x_t, \dots, x_{nt})$
- $u^t = (u_{1t}, \dots, u_{nt})$ vector de precios sombra de los inputs
- $v^t = (v_{1t}, \dots, v_{mt})$ vector de los precios sombrea de los outputs

A partir de lo anterior se obtiene la productividad media para la firma t. Este proceso implica dos restricciones, la primera que el vector de precios sombra no puede ser menor a cero para ninguna de las firmas (para inputs y outputs), además, los vectores varían entre firmas.

$$AP_t = \frac{\Sigma_{r=1}^m v_{rt} y_{rt}}{\Sigma_{i=1}^n u_{it} x_{it}} \leq 1 \; ; \; u_{it} \geq 0; i = 1,2,..,n \; ; v_{rt} \geq 0; r = 1,2, \dots, m)$$

Existe una amplia gama de vectores de precios que podrían satisfacer las condiciones anteriores por lo tanto es necesario aplicar un proceso de programación lineal para poder alcanzar los precios sombra óptimos para la estimación de la eficiencia. Debido a la dificultad que se presenta al ser AP_t una función objetivo fraccional, se aplica la siguiente transformación.

- $w_{it} = ku_{it} \; ; k > 0$
- $p_{rt} = kv_{rt}$

El nuevo proceso de maximización se define de la siguiente manera.

$$max \sum_{r=1}^{m} p_{rt} y_{rt}$$

Sujeto a:

$$\sum_{r=1}^{m} p_{rt} y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} w_{it} x_{ij} \leq 0 \,; j = 1, \dots, t, \dots N$$

$$p_{rt} \geq 0$$

$$w_{it} \geq 0$$

Si se toma el supuesto de una función de producción (F) con rendimiento constantes a escala se da que:

$$\sum_{i} \frac{\partial F}{\partial x_i} x_i + \sum_{i} \frac{\partial F}{\partial y_j} y_j = 0$$

Aplicando esta restricción a todas las firmas bajo consideración, obtenemos una estimación para la eficiencia de cada firma la cual se define como:

$$\prod_{t} = \frac{Y_t}{Y_t^*} = Y_t = p^{t'} y^t$$

El lenguaje de programación *R* facilita una *librería* para el cálculo de la eficiencia de las plantas de tratamiento.

Capítulo 2

Plantas de tratamiento en Mendoza

AySAM gestiona un total de 21 instalaciones depuradoras dedicadas al tratamiento de 4.000 litros por segundo de aguas residuales provenientes de 350.000 conexiones. El tratamiento predominante se realiza mediante lagunas facultativas, con 13 instalaciones que tratan en promedio 201.400 m^3 de agua residual al día. Además, existen 5 plantas con tecnología de lodos activados, con un volumen diario de 3.500 m^3; y 6 plantas con cámaras sépticas, con un volumen diario de 1.390 m^3, principalmente ubicadas en el departamento de Las Heras. La operatividad de estas plantas supera la capacidad inicial de diseño, ya que, en las condiciones de operación vigentes, el rendimiento promedio de depuración se encuentra aproximadamente un 80% por encima de su capacidad nominal, siendo solo tres plantas las que operan dentro de los límites estipulados. Esta implica costos adicionales en términos de operación y mantenimiento, provoca un deterioro en la infraestructura y compromete la toma de decisiones técnicas y gerenciales.

Tabla 1

Plantas de Tratamiento Mendoza-2021

Planta	Cantidad de Conexiones	Población Servida Aproximada (hab.)	Caudal Afluente Actual (litros/segundo)	Cap. Nominal de Tratamiento (litros/segundo)	Caudal vs Capacidad (litros/segundo)
CAMPO ESPEJO	110631.21	442524.83	1516.06	1800.00	84%
PARAMILLO	137314.29	549257.14	1780.00	1500.00	119%
SAN MARTÍN	18518.00	52652.97	170.63	125.00	137%
TUNUYÁN	8961.00	21347.58	75.11	20.00	376%
RIVADAVIA	8551.00	29681.49	96.19	56.00	172%
GENERAL ALVEAR	6773.00	19642.00	65.35	45.00	145%
PALMIRA	5505.00	20057.14	65.00	25.00	260%
LA PAZ	2174.00	6171.43	20.00	15.42	130%
SAN RAFAEL	33191.00	9257.14	30.00	30.00	100%
SAN CARLOS	1194.00	7276.11	23.58	10.00	236%
JUNÍN	2664.00	6171.43	20.00	11.00	182%
VILLA TULUMAYA	5277.00	3617.53	11.72	-	-
COSTA DE ARAUJO	870.00	4320.00	14.00	5.00	280%
POTRERILLOS	121.00	484.00	2.00	3.30	61%
USPALLATA	1739.00	5465.00	35.00	16.00	219%
POLVAREDAS	51.00	696.00	11.00	-	-
PUNTA DE VACAS	46.00	184.00	1.00	-	-
PENITENTES	224.00	896.00	3.00	-	-
PUENTE DE INCA	56.00	224.00	1.00	-	-
COLONIA LAS ROSAS	20	80	0.3	-	-
SANTA ROSA (en ejecución)	975	3900	SIN SERVICIO	15	-

Fuente: Elaboración propia en base a datos de AySAM S.A.

La muestra de análisis se redujo a ocho de las 21 plantas. Las seleccionadas fueron: Junín, San Martín, Palmira, Campo Espejo, Paramillo, Tunuyán y San Rafael.

La selección se debe fundamentalmente a la dificultad para simular alguno de los datos en *Poseidón,* puntualmente no hay información sobre la calidad de los efluentes que entran a todas las plantas. *Poseidón* resultó ser muy útil en cuanto a la cantidad de horas necesarias para cada cadena de tratamiento y costos, pero no para la cantidad de energía demandada; por ejemplo, en Campo Espejo el programa daba un consumo de nulo de energía.

A continuación, se realiza una breve descripción de cada una de las plantas seleccionadas.

Paramillo

En el noroeste de la provincia, en el departamento de Lavalle, se localiza la segunda planta depuradora más importante de Mendoza. En el mismo se trata los efluentes de la mitad de la población del Gran Mendoza (1700 l/s). Originalmente, la planta estaba diseñada por cuatro series, cada serie formada por tres piletas, y luego se añadió tres lagunas en serie de gran envergadura, pero estas últimas no fueron diseñadas correctamente para el tratamiento, al menos no con cálculos ingenieriles y no estarían correctamente aislados ni con geomembrana ni con arcilla. Actualmente, se está finalizando con la obra de un sistema de aireación extendida para complementar el tratamiento actual. Este tipo de sistema requiere de un gran equipamiento electromecánico, entre ellos sopladores, que elevan los consumos de forma exponencial y operativamente también requiere de mayor personal. Las aguas tratadas son concedidas para la agricultura, para ello, se cedieron terrenos de AySAM para la producción utilizando las aguas tratadas. Existe una organización para dotar a los productores agrícolas con terreno para la explotación agrícola siguiendo estrictos controles de calidad y manejo, se estiman que la superficie asciende a 200 ha. Esta planta cuenta con playas de secado de los lodos que se van retirando.

Campo Espejo

En la década de los ’70 se inició una PTAR con lodos activados. Sin embargo, su mantenimiento y operación era costoso que se decidió en los ’90, cambiar al sistema de lagunas de estabilización. Actualmente, se tratan los efluentes cloacales proveniente de la población del departamento de Las Heras y de la mitad del gran Mendoza. La planta cuenta con 12 series de tres piletas cada uno, tratando un caudal de aprox. 1700 l/s, cuando su capacidad óptima es de 800/900 l/s. Las piletas están revestidas de arcilla y bentonita, en vez de geomembrana. Cada pileta tiene una dimensión de 100x900 metros y la profundidad adecuada debería ser de 2,5 metros. En los líquidos cloacales se controlan una serie de parámetros, tanto al ingreso como a la salida, siguiendo la Res. 400 de la DGI.

Problemáticas:

- La planta no se ha ido adaptando al crecimiento poblacional, es por ello que se está tratando un caudal más alto para el cual están diseñadas.

• Sumado a lo anterior, la capacidad de tratamiento de la planta ha reducido considerablemente debido a la gran acumulación de lodos en la primera pileta de todas las series. Estos lodos, deberían ser retirados cada 10 años, pero ya han pasado 20 y no se ha logrado conseguir financiamiento. También, la acumulación de lodos ha permitido el asentamiento de juncos en gran cantidad.

• El vandalismo no es tan problemático como en otras plantas, ya que solo se usa geomembrana en el canal de salida.

• Hay un par de series que no están en funcionamiento debido a la falta de mantenimiento.

• Se ha planificado construir piletas de secado para la colocación de los lodos, o bien seguir el procedimiento de estabilización de los lodos con silo bolsas[9] (según una normativa nacional sobre plantas de efluentes).

Fortalezas:

• Debido a la disposición de terreno se cuenta con la posibilidad de la construcción de nuevas lagunas.

• Hay un riguroso control de los lodos, se toma continuamente muestras que son analizadas en laboratorios. Estos datos demuestran que los lodos están libres de metales pesados, solo se ha reportado una vez la presencia de cianuro y el ingreso de un contaminante que mató a la población acuática de las piletas.

Tunuyán

Se encuentra a la vera de la Ruta Nacional 40. La planta cuenta con cuatro lagunas facultativas, que cubren una superficie de 8,5 hectáreas, pero solo están operativas tres de ellas. Las cuatro lagunas fueron diseñadas para soportar un caudal de 30 l/s, sin embargo, actualmente se encuentran operando aprox. 75 l/s, superando el doble de su capacidad de trabajo. Además, existe mayor pérdida de operatividad debido a la gran acumulación de lodos en las lagunas.

En la cámara de pretratamiento, las rejillas que retienen sólidos de mediano y gran tamaño fueron retiradas, observándose en las lagunas restos de plásticos y otros residuos flotando o depositados junto con los lodos. El colector principal debido a múltiples roturas perdió su

[9] Bolsones perforados donde se coloca los lodos para que estos drenen junto con un coayudante para neutralizarlos.

funcionalidad y se desvía el agua del recorrido principal por un by-pass, y la casilla donde se le añadía hipoclorito no funciona. Por el momento, el agua que sale al final de las piletas es conducido por un baipás no revestido, el cual charcos sobre el callejón de circulación.

La ausencia de vigilancia permanente ha permitido que el asentamiento de fauna silvestre: patos, teros y aguiluchos; al igual que animales domésticos como perros. Del mismo modo, el bajo mantenimiento del predio ha permitido la proliferación de herbáceas[10] típicas de la región.

San Rafael

Se localiza a las afueras de la ciudad con dirección al este, ubicada en terrenos cedidos por el Ejército Argentino, con el cual se mantiene un convenio vigente. Las piletas abarcan una superficie de aproximada de 18,5 ha, el tratamiento es secundario, la planta está conformada por dos lagunas aireadas, cuatro facultativas y una para la disposición de los camiones atmosféricos (antigua planta).

En los últimos 5 años, se construyeron tres series de dos lagunas, en el que se tratan el 100% de los efluentes generados en la ciudad de San Rafael. Esperan que en poco tiempo recibir los efluentes de la cabecera norte del departamento, cuando se termine de construir el colector. Incluir los efluentes de la cabecera norte no sobrepasaría la capacidad de la planta, hoy en día se estima que la planta está operando al 60% de su capacidad. Igualmente, se prevé construir una nueva seria en reemplazo de la laguna original, así de esta forma se aseguraría la capacidad de la planta para el incremento poblacional de los próximos 10 años.

El funcionamiento de la planta comienza con por conducir el efluente crudo por unas rejillas que retiene el sólido grueso y medio. Una vez realizado el pre tratamiento el agua pasa a una cámara húmeda donde 5 bombas elevan el efluente al canal de derivación con tres separadores para que se repartan entre las series hacia los canales de distribución pasando primero por las lagunas aireadas y de estas a las facultativas para terminar en la cámara de contacto. En el caso de la planta antigua, el agua se manda por un baipás hacia la cámara de contacto donde se mezcla con hipoclorito. El ACRE[11] se encuentra conformado y se emplea para pasturas, no hay extracción de lodos. En el caso de fallas en el sistema eléctrico la planta sigue realizando tratamiento mandando directamente por el baipás mencionado a la cámara de contacto. Si bien se emplea agua de pozo

[10] Plantas vasculares que no tienen tallos leñosos persistentes sobre el suelo
[11] Área de Cultivos Restringidos Especiales

para “arrastrar” el hipoclorito, se puede seguir haciendo disposición del mismo en caso de que la bomba no funcione.

En promedio el gasto en electricidad es alrededor del millón de pesos (por mes para el año 2021), se tiene un sistema eléctrico aparte para las lagunas y el consumo en verano es mayor debido al calentamiento de las bombas y del sistema de aireación. Actualmente trabajan cinco personas en turnos rotativos de seis horas esto ha ayudado no solo al funcionamiento de la planta sino también a disminuir el vandalismo, a diferencia de otras plantas no ha habido grandes robos de membrana siendo que en algunas partes de las lagunas es de fácil acceso. Ninguno de los trabajadores se encarga del mantenimiento de la maquinaria, sino que un electromecánico realiza visitas según el horómetro, además no tienen las herramientas necesarias para llevar a cabo el desmalezado. No cuentan con sistemas que les informe sobre el funcionamiento de los sopladores o para ver los caudales, y solo pueden reponer los sopladores bajo autorización previa. La planta en general se encuentre en muy buen estado.

San Martín, Palmira y Junín

La descripción se hace forma conjunta debido a la brevedad de las visitas a cada una y las similitudes que guardan entre sí.

En Palmira, la planta de tratamiento de aguas residuales está conformada por tres lagunas, tanto anaeróbicas como aeróbicas. Sin embargo, enfrenta desafíos operativos y de mantenimiento, incluyendo la carencia de personal permanente y la ausencia de un sistema de monitoreo efectivo. La planta opera por encima de su capacidad, requiriendo la extracción de lodos, y se prevén planes de inversión para su ampliación. En San Martín, al igual que en Palmira y otras plantas, se enfrentan problemas generales de operación y mantenimiento. La calidad del agua se ve afectada por la presencia de industrias, y se estima que se necesitan más recursos humanos, con solo 7 destinados a Junín, Rivadavia y San Martín hasta fines de 2021. En Rivadavia, el tratamiento inicial implica aireación, y actualmente se está construyendo una nueva laguna.

Capítulo 3

Tecnologías y tipos de tratamiento

Si bien en el capítulo inmediato anterior se explicó un poco sobre los procesos de tratamiento de las PTARS de Mendoza en post de una mejor interpretación de las regresiones econométricas resulta de suma relevancia definir de forma apropiada las tecnologías de tratamiento.

El método más común en Mendoza son las *Lagunas de Estabilización*, existiendo tres tipos; *facultativas*, *anaerobias* y *aerobias*. Consisten en grandes cuerpos de agua (lagunas artificiales) que pueden utilizarse individualmente o en serie propiciando una remoción de agentes bacteriológicos más eficiente (Tilley, 2011). Si se usan en serie, lo optimó seria 1) anaerobias, 2) facultativas y 3) aerobias, la primera de las lagunas es de mayor profundidad, se realiza una reducción de la carga orgánica la cual se acumula junto los sólidos y DBO[12] por medio de sedimentación[13] y la subsecuente digestión anaerobia dentro del lodo.

En forma de cadena el efluente de la laguna aerobia pasa a la facultativa la cual posee una menor profundidad y en donde se continua la remoción de DBO. La laguna recibe oxígeno (de forma natural) y la fotosíntesis promovida por algas terminan privando la capa más baja de oxígeno, los sólidos se acumulan y digieren el fondo de la laguna. La reducción que se logra de DBO es hasta un 75% (Tilley, 2011).

Por otra parte, las lagunas aerobias están diseñadas para remover patógenos y proporciona el nivel final de tratamiento. Tiene una menor profundidad que las anteriores garantizando una mayor penetración de la luz para que produzca la fotosíntesis necesaria para la eliminación de los patógenos.

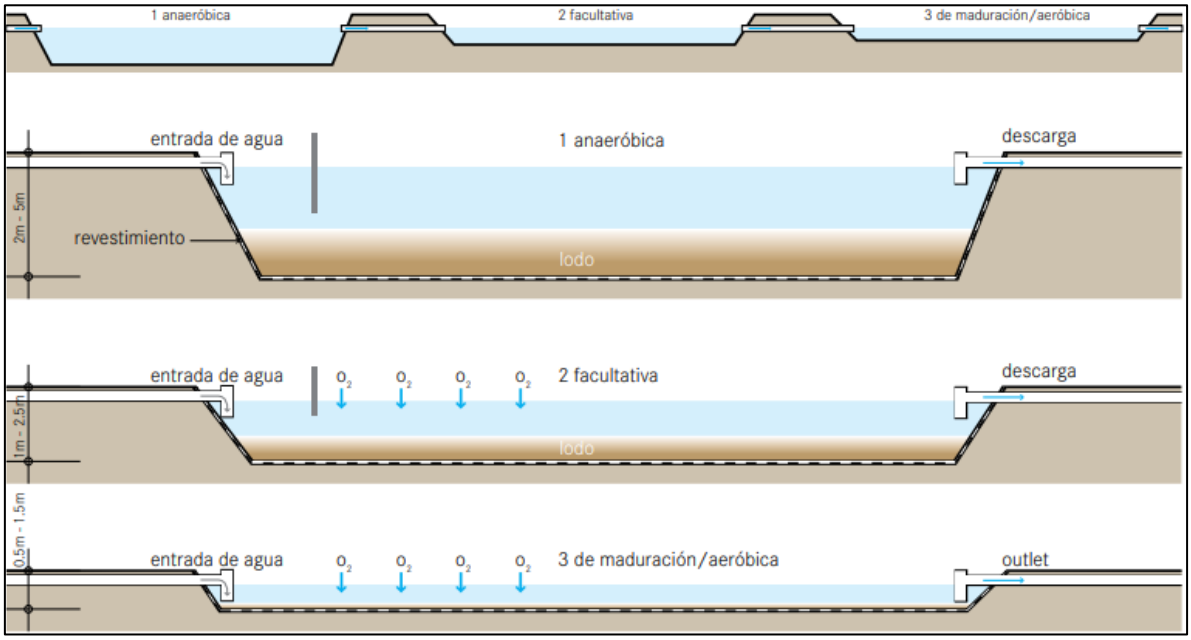
Esta tecnología de tratamiento tiene una serie de aspectos a mencionar, es de alta idoneidad en zonas en las cuales existe una gran cantidad de terreno sin utilizar. Requiere de relativamente poco mantenimiento sobre todo apuntando a la eliminación de malezas, remoción de espuma, y extracción de los lodos para evitar acumulación que termine afectando el tratamiento. Tiene la ventaja de que garantiza una alta reducción de sólidos, DBO y patógenos; por el lado de los costos, estos son bajos sobre todo en lo que respecta al consumo eléctrico, pero la inversión inicial puede ser muy alta dependiendo especialmente del terreno a ocupar. Además, se

[12] Demanda bioquímica de oxígeno.
[13] Separación sólido-fluido por la acción de la gravedad.

tiene que garantizar una adecuada remoción y tratamiento de los lodos acumulados lo termina implicando un elevado costo.

Ilustración 1

Tratamiento por Lagunas de Estabilización – "*Compendium of Sanitation Systems and Technologies"*



Fuente: Tilley (2018, p.111)

En base a la presentación de las PTARs del capítulo anterior se observa que en general presentan esta serie de problemas; acumulación de lodos, bajo mantenimiento y necesidad de ampliar las plantas. Por ende, esto tendría que terminar afectando la eficiencia de las PTARs. Tener en cuenta que tal como se muestra en la *Tabla 2* ninguna de las plantas tiene esta sucesión de lagunas, sino que presentan de un solo tipo en varias series.

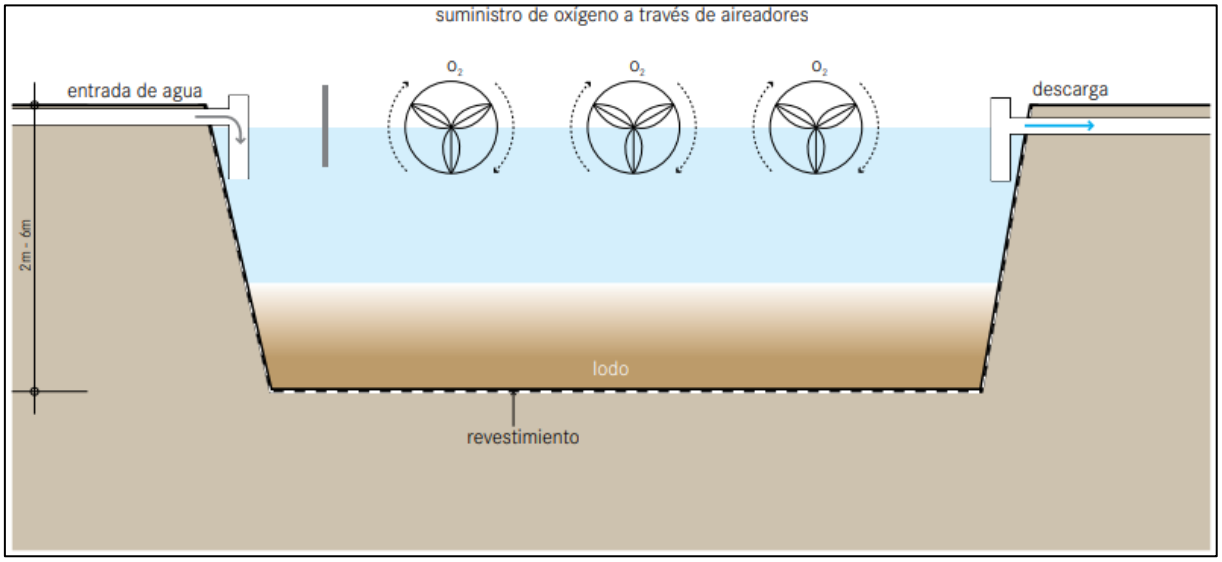
Algunas de las plantas como son San Rafael, Rivadavia y Santa Rosa están transicionando a otras tecnologías (estas últimas están todavía en construcción) puntualmente a *Lagunas Aireadas*. Estas son un reactor grande, mixto y aerobio, donde se proporciona oxígeno manteniendo a los organismos aerobios suspendidos y mezclados con agua, logrando una alta tasa de degradación orgánica (Tilley, 2011).

Idóneamente es necesario que exista un pretratamiento y que tenga un suministro ininterrumpido de energía lo cual implica un alto costo, tal como se verá más adelante para el caso

de San Rafael. Tienen la ventaja que se pueden usar en entornos urbanos y que pueden funcionar aún en climas fríos (debido a que no necesitan del sol para la fotosíntesis). Al igual que el tratamiento antes descripto se necesita de una adecuada extracción y manejo de los lodos.

Ilustración 2

Lagunas Aireadas - "*Compendium of Sanitation Systems and Technologies"*



Fuente: Tilley (2018, p.113)

Por último, el sistema utilizado en Junín. Una zanja de oxidación es una variante del sistema biológico de tratamiento con lodos activados, empleando un largo tiempo de retención de sólidos para eliminar compuestos orgánicos biodegradables. Por lo general, estas zanjas operan como sistemas de mezcla completa, pero pueden adaptarse para simular condiciones de flujo en pistón, aunque esto requiere la difusión de aire para mantener la mezcla adecuada, alterando la función original de la zanja. Estos sistemas tienen configuraciones de anillo, óvalo o tanque en forma de herradura, con uno o más canales, siendo comúnmente denominados reactores tipo carrusel. La circulación del agua, la transferencia de oxígeno y la aireación en las zanjas se logran mediante aireadores montados de forma vertical u horizontal. Tiene la ventaja de utilizar menos energía que un sistema de lodos activas, minimiza el tiempo de actividad y da un efluente de energía (Tilley, 2011).

Se tiene que recalcar que es esencial que exista un tratamiento primario (Tilley, 2011), que elimina principalmente sólidos y materia orgánica mediante procesos de sedimentación o flotación. Después, el tratamiento secundario se lleva a cabo para eliminar materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos del efluente. Dependiendo de la configuración, la definición de tratamiento secundario puede incluir la remoción de nutrientes como el fósforo y la desinfección.

Tabla 2

Tipo y Sistema de Tratamiento PTARs Mendoza

Nombre	Tipo de Tratamiento	Sistema
CAMPO ESPEJO	Secundario	Lagunas de Estabilización Facultativas
PARAMILLO	Secundario	Lagunas anaeróbicas primarias+secundarias y terciarias facultativas. Y Campo Este Lagunas aeróbicas
SAN MARTÍN	Secundario	Lagunas de Estabilización Facultativas
TUNUYÁN	Secundario	Lagunas de Estabilización Facultativas+disposición en melgas de infiltración
PALMIRA	Secundario	Lagunas de Estabilización Facultativas
SAN RAFAEL	Primario	Lagunas Aereadas
JUNÍN	Secundario	Zanja de Oxidación
COSTA DE ARAUJO	Secundario	Lagunas de Estabilización Facultativas

Fuente: Elaboración propia en base a AySAM S.A.

Capítulo 4

Dificultades para la obtención de datos

El mayor obstáculo que se tuvo fue la obtención de datos, si bien desde AySAM se mostraron muy receptivos a consultas y facilitaron el acceso a información que no se tenía, sólo se contaba con los últimos años de operación. A raíz de esta problemática se decidió utilizar la herramienta "Poseidón", la cual surge en el marco del proyecto UE Coroado. Con lo recabado durante las visitas a las PTARs y la colaboración de ingenieras se caracterizaron los procesos productivos, calidad del efluente (entrada y salida), cantidad de m^3 tratados, bombeo, gastos en energía, etc. Una vez caracterizadas se utilizó el software para obtener estimaciones (anuales) para el período 2011-2021, dando como resultado un base de datos de panel

Software Poseidón

"Poseidón en sí es una herramienta de Excel simple, eficiente y orientada al usuario, que tiene como objetivo comparar diferentes técnicas de tratamiento de aguas residuales en función de sus eficiencias de eliminación, sus costos y otros criterios de evaluación adicionales. Además, se explica el fondo de las diferentes tecnologías relacionadas con la reutilización del agua y la teoría subyacente. Poseidón se puede aplicar antes de un estudio de viabilidad más detallado para evaluar posibles opciones de reutilización del agua y puede mostrar a los tomadores de decisiones y otros interesados que existen soluciones implementables para cumplir con los requisitos locales". (Oertlé. E, 2016, p.2).

Poseidón surgió como parte del proyecto europeo Coroado, cuya misión es avanzar en el desarrollo y la difusión de tecnologías destinadas al reciclaje y la reutilización del agua en América Latina. A través de evaluaciones, herramientas de toma de decisiones y estrategias aplicables, Coroado se propuso innovar y ajustar conceptos existentes para impulsar la reutilización del agua. El resultado fue la creación de una caja de herramientas en línea, centrada en tecnologías de reutilización y reciclaje en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Poseidón, en sí mismo, se presenta como una herramienta eficaz de Excel, fácil de utilizar y dirigida al usuario. Su objetivo principal es comparar diversas técnicas de tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta su eficiencia de eliminación, costos y otros criterios de evaluación relevantes.

Simulaciones

Para poder llevar a cabo el análisis de eficiencia económica y técnica de las PTARs, y estimar una función de producción, se hizo uso de las siguientes variables.

Tabla 3

Variables Empleadas y Obtenidas

Variable	Notación	Medida	Carácter	Tipo de Dato
Agua tratada	m3_a	Metros cúbicos anuales	Técnica	Secundario
Kilowatts	kwh_y	Kwh por año	Técnica	Primario
Horas trabajadas	horas_y	Horas al año	Técnica	Primario
Precio de la hectárea	p_hec	USD	Económica	Secundario
Costo de capital anualizado	capital_c	USD	Económica	Primario
Costo anualizado del terreno	tierra_c	USD	Económica	Primario
Costo anual de energía	energy_c	USD	Económica	Primario
Costo anual de O&M	om_c	USD	Económica	Primario
Precio del kwh	p_kWh	USD	Económica	Secundario
Precio de la mano de obra	p_horas	USD por hora	Económica	Secundario
Turbidez	Turb	Unid. nefelométrica turbidez	Técnica	Secundario
Solidos totales suspendidos	TSS	Mg / litro	Técnica	Secundario
Demanda biológica de oxígeno	BOD	Mg / litro	Técnica	Secundario
Demanda Química de Oxígeno	COD	Mg / litro	Técnica	Secundario
Nitrógeno total	TN	Mg / litro	Técnica	Secundario
Fósforo total	TP	Unid. formación de colonias 100 ml	Técnica	Secundario
Coliformes totales	TC	Unid. formación de colonias 100 ml	Técnica	Secundario
Sólidos disueltos totales	TDS	Mg / litro	Técnica	Secundario
Nitratos	Nitrate	Mg Nitrógeno como nitrato / litro	Técnica	Secundario
Carbono orgánico total	TOC	Mg / litro	Técnica	Secundario
Unidad formadora de placas	Virus	Bacteriófagos en aguas superficiales	Técnica	Secundario

Fuente: Elaboración propia

La distinción en el tipo de dato corresponde a que los primarios son aquellos que se obtuvieron mediante las simulaciones en Poseidón, mientras que los secundarios fueron provistos por AySAM S.A y por las siguientes fuentes de información.

- Para homogeneizar los costos se utilizó el valor del dólar oficial (Comunicado 3500, BCRA).
- Los agentes químicos y bacteriológicos necesarios para definir la calidad de los efluentes de cada planta de tratamiento se obtuvieron mediante estimaciones realizas en el marco del proyecto *"Economía Circular y Transición Energética en PTARs Mendoza"* haciendo uso de información facilitada por AySAM S.A.
- El precio de la mano de obra se obtuvo mediante los datos de la

A continuación, se presenta una explicación detallada de las simulaciones llevadas a cabo con Poseidón.

1- Se personalizaron cuatro versiones de Poseidón, dónde cada una de estas contenía el análisis para tres plantas de tratamiento.
   - Los grupos de análisis fueron
   - Campo Espejo-Paramillo-Palmira
   - Junín-Costa de Araujo-La Paz
   - San Rafael-San Carlos-Santa Rosa
   - San Martín-Tunuyán-Rivadavia
2- Se cargaron los datos primarios de la Tabla 1, los que fueron los insumos para realizar cada uno de los siguientes cálculos.
3- En cada una de estas versiones se replicó el cálculo para cada variable, haciendo esto para cada año del período (2010-2021).
4- Para el determinar las cantidades de energía, tierra, horas de trabajo, etc, *Poseidón* emplea la siguiente función.

$$y = \alpha Q^{\beta}$$

Dónde:

$y = Variable\ que\ se\ pretenda\ estimar$

$Q = Flujo\ promedio\ diario$

Los coeficientes α, β los obtiene mediante una regresión lineal[14] de la función en cuestión.

5- Para el cálculo de los costos (salvo para el CAPEX[15]) sigue la misma lógica.

$$y = cQ^{\beta}$$

[14] Los datos para llevar a cabo el cálculo de las regresiones se encuentran pre cargados en el software.
[15] Capital Expenditure (Gastos de capital).

Dónde:

$y = Costo\ que\ se\ pretenda\ estimar$

$Q = Flujo\ promedio\ diario$

Y nuevamente los coeficientes c, β se estiman mediante una regresión lineal.

6- Cálculo del CAPEX

Tabla 4

Algoritmo para el cálculo del CAPEX

Factor	Utilizado en el sistema	Valor por default
Costo de equipamiento (EC)	Definido para cada tecnología en base los coeficientes de la regresión (Ecuación (1)).	EC
Costo de construcción (CC)	Instalación de equipo, piping, instrumentación y control.	39% de EC
Costos indirectos	Ingeniería y contingencia.	27% de CC
CAPEX	Costo total de la construcción + costos indirectos	CAPEX = 1.77 EC

La *Tabla 4* fue directamente extraída de "Poseidon—Decision Support Tool for Water Reuse. Water" (Oertlé, E., Hugi, C., Wintgens, T., & Karavitis, C., 2019, p. 10)

El resultado total costo de capital es anualizado en base a su vida útil (esto se hace para cada unidad de proceso. De la multiplicación de CRF y el costo total de capital, resulta el costo total anualizado del capital.

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = \frac{r}{1-(1+r)^{-n}}$$

CRF = Capital recovery factor.

$r = tasa\ de\ descuento \approx i - \pi$[16]

n = Vida útil esperada del capital

[16] Aproximación de Fisher para el cálculo de la tasa de interés real.

7- Mediante la siguiente fórmula se obtiene el cálculo total para cada unidad de tratamiento.

$$total_c = \sum_{i=1}^{N} (CAPEX_{Ann} + O\&M_{Ann} + Land_{Ann} + Energy_{Ann} + Labour_{Ann})$$

Dónde.

$\mathrm{N} = \text{Número de unidades de proceso}$

$\mathrm{CAPEX_{Ann}} = \text{Costo anual de capital de n}$

$\mathrm{O\&M_{Ann}} = \text{Costo anual de O\&M de n}$

$\mathrm{Land_{Ann}} = \text{Costo anual de la tierra de n}$

$\mathrm{Energy_{Ann}} = \text{Costo anual de la energía de n}$

$\mathrm{Labour_{Ann}} = \text{Costo anual del trabajo}$

8- Se sumaron los costos de cada una de las unidades de proceso.

9- Por último, se repitió el proceso para cada uno de los años en análisis.

El único dato de las simulaciones que no se empleo fue el de Kwh y el correspondiente costo de electricidad. Esto debido a que AySAM S.A. facilitó las facturas de consumo energético de las plantas de Junín, San Martín, Palmira, Campo Espejo, Paramillo, Tunuyán y San Rafael; mismo motivo por el cual se seleccionaron 8 de las 12 plantas estimadas en un principio.

Como resultado de las simulaciones se obtuvo una base de datos en forma de panel con 8 plantas de tratamiento y 11 años de período.

Capítulo 5

Variables

Las estimaciones de los modelos SFA y DEA explicados en el capítulo 2 se llevaron a cabo a partir de las siguientes variables.

Tabla 5

Variables SFA y DEA

Variable	Tipo	Unidad
year	Serie de Tiempo	-
plant	Corte Transversal	-
m3_year	Explicada	Milimetros cúbicos tratados
kwh_year	Explicativa	Kwh empleados al año
ph_y	Explicativa	Horas trabajadas al año
t	Explicativa	Número de períodos
mt	Explicativa	Tendencia[17]
c_labour	Explicativa	USD, costo horas trabajadas
c_kwh	Explicativa	USD, costo kwh
c_land	Explicativa	USD, costo de la tierra
c_om	Explicativa	USD, costo de O&M[18]

Fuente: Elaboración propia.

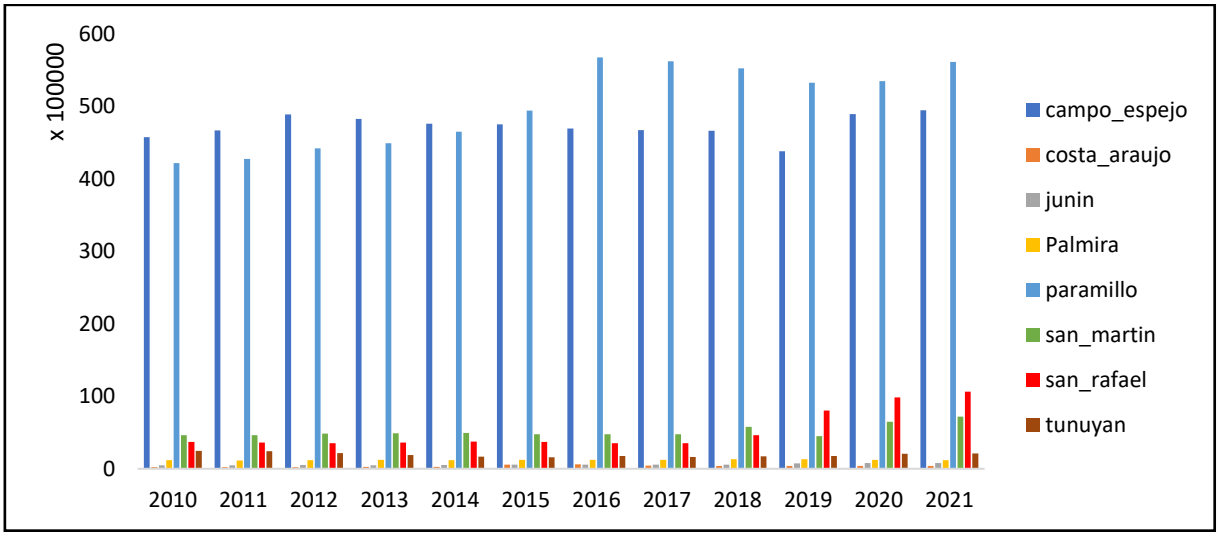
Como se observa en la *Figura 1*, Campo Espejo y Paramillo son las plantas que mayor cantidad agua tratan para todo el período, pero en *Figura 2* se ve que estas se han mantenido relativamente constantes mientras que San Rafael fue la que más aumento el caudal de agua.

En base a la Tabla 1 es de esperar que las estimaciones arrojen que las plantas con mayor eficiencia sean aquellas que se encuentran más cercanas al máximo de m^3 que pueden recibir, tales como Campo Espejo, San Rafael y Paramillo.

[17] Busca medir la tendencia del cambio tecnológico en caso de existir, $mt = t - media(t)$.
[18] Costos de operación y mantenimiento.

Figura 1

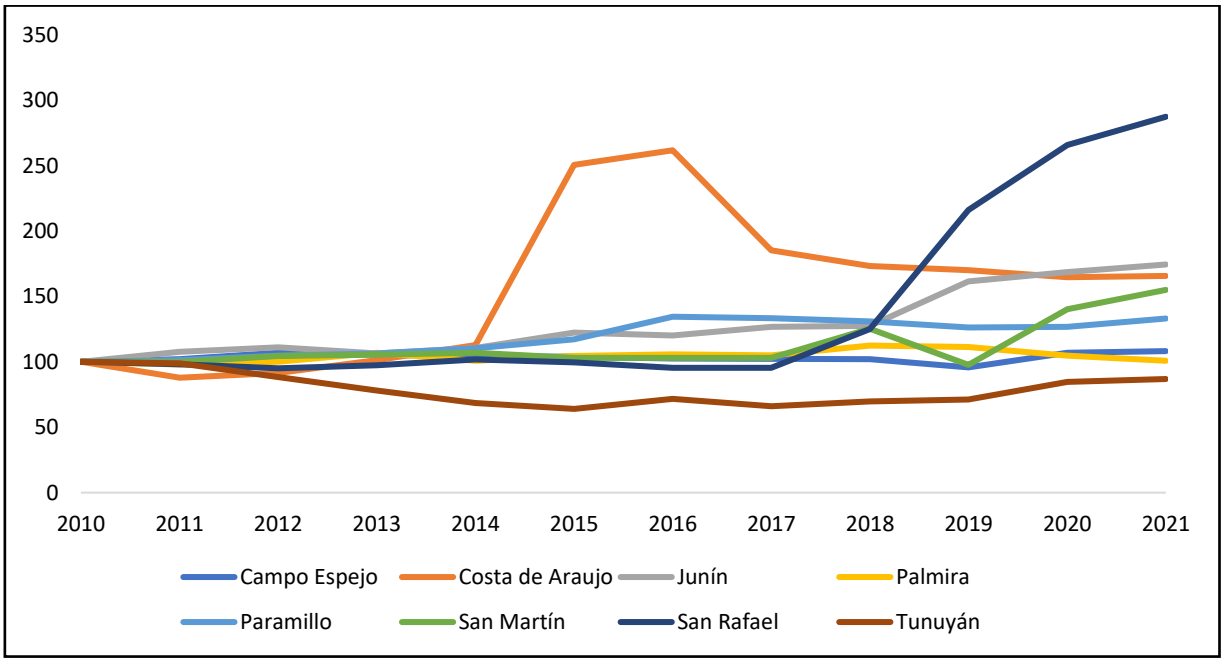
Volumen de efluente tratado por planta 2010-2021



Fuente: Elaboración propia en base a AySAM S.A.

Figura 2

Evolución Base 100 volumen de efluentes

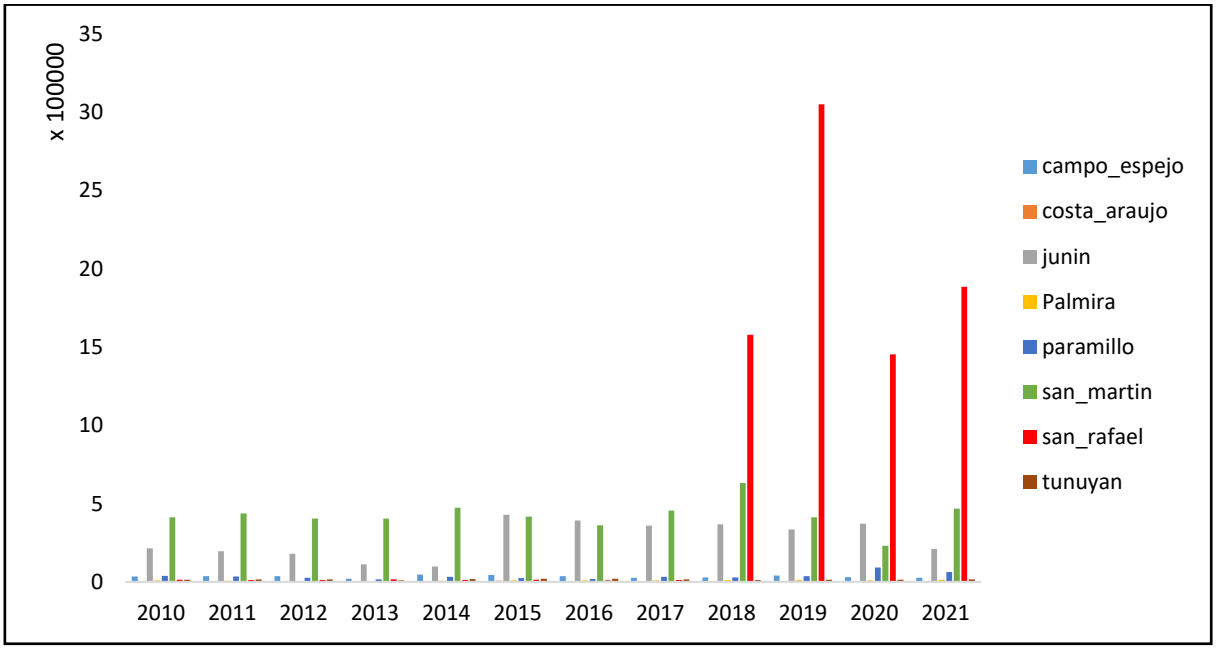


Fuente: Elaboración propia en base a AySAM S.A.

Si bien los signos esperados para las variables *kwh_year, ph_year* es que sean positivos puede que se de el caso en que la primera de estas no lo sea, ya que las tecnologías de tratamiento que tiene las plantas, en general, no incluyen grandes gastos de energía. La excepción es San Rafael, ya que a partir del 2017 cambio su tecnología a lagunas aireadas que como se explicó en el Capítulo 3 requiere un uso constante de energía para los sopladores. Dicho cambio de tecnología y su impacto en el consumo de *kwh* se ve en la *Figuras 3.*

Figura 3

Evolución del consumo energético anual (kWh/año)

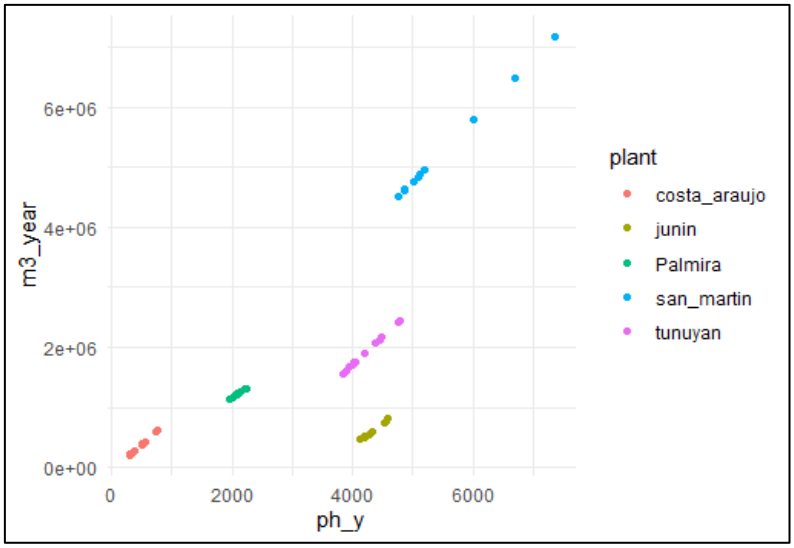


Fuente: Elaboración propia en base a AySAM S.A.

La estimación de la cantidad de horas trabajadas (ph_y) mantiene una clara relación creciente con la cantidad de m3 tratado al año. Se separaron en dos figuras (*Figura 4 y 5*) dada la gran diferencia de volúmenes de agua entre las plantas.

Figura 4

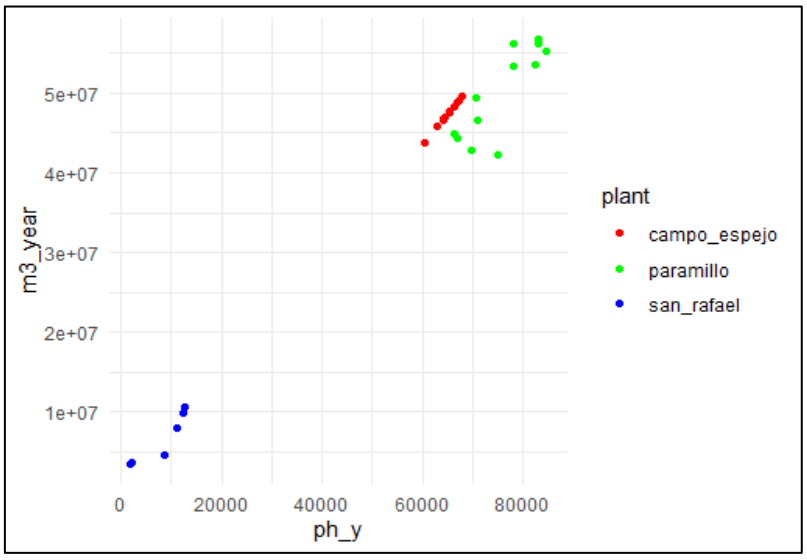
Relación volumen de efluentes tratados con horas de trabajo



Fuente: Elaboración propia en base a datos simulados y AySAM S.A.

Figura 5

Relación Horas de Trabajo vs M3, Plantas Seleccionadas



Fuente: Elaboración propia en base a datos simulados y AySAM S.A.

Estimaciones SFA

Tabla 6

Variables a estimar SFA

Variable	Tipo	Signo Esperado
year	Serie de Tiempo	-
plant	Corte Transversal	-
m3_year	Explicada	-
kwh_year	Explicativa	>0
ph_y	Explicativa	>0
mt	Explicativa	>0
c_capital	Explicativa	>0

Fuente: Elaboración propia

Como frontera de producción se optó por usar una función *Cobb-Douglas*[19], ya que es una de las funciones recomendadas para este tipo de análisis. (Henningsen, A.,2019)

En términos matemáticos,

Cobb-Douglas

$$y = L^{\alpha} K^{\beta}$$

Donde α y β son los parámetros a estimar. En el modelo econométrico *SFA* se utilizó $c_capital$ como proxy de K (capital), ph_y como proxy de L (trabajo), se agregó como factor productivo a kwh_year y además se incluyó un factor de tendencia para captar el cambio en tecnológico ($mYear$).

Modelo General en base a la función Cobb-Douglas

$$\ln y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln kwh_year_{it} + \alpha_2 \ln ph_y_{it} + \alpha_3 \ln c_capital_{it} + mYear + a_i + \epsilon_{it}$$

$$\alpha_i = c_i + \eta_i$$

$$\epsilon_{it} = v_{it} - u_{it}$$

En ninguno de los modelos estimados la variable $c_capital$ fue significativa, además de que siempre que se incluía, con el test de *Resset-Ramsey* (Ramsey, 1969) se rechazaba la hipótesis nula de correcta especificación del modelo.

[19] También se estimó un función Translogarítmica pero ningún modelo fue significativo.

La inclusión en la estimación de *Efectos Fijos* no aportó mejoras al modelo e incluso implicó problemas de convergencia en *MLE*[20]. Similares fueron los resultados con la variable $mYear$ (problemas de especificación y convergencia).

Señalado esto se presentan las regresiones que mejor ajuste tuvieron.

Eficiencias individuales invariantes en el tiempo

$$\ln\ m_year_{it} = 9.83 - 0.08 \ln kwh_year_{it} + 0.79 \ln ph_y_{it} + v_{it} - u_{it}$$

Tabla 7

Estimación Eficiencias individuales invariantes en el tiempo

Variable	Estimate	Std_Error	z_value	Pr_gt_z
(Intercept)	9.83	0.29	33.52	< 2.2e-16
log(kwh_year)	-0.08	0.02	-5.24	1.61E-07
log(ph_y)	0.79	0.04	22.11	< 2.2e-16
sigmaSq	1.14	0.58	1.99	0.04665
gamma	0.99	0.01	172.55	< 2.2e-16
log likelihood value				37.35
mean efficiency				0.58

Fuente: Output estimación SFA R.

"Sorprende" el hecho de que un mayor gasto en energía no implique un mayor nivel de tratamiento, pero en base al *Capítulo 3* las PTArs de Mendoza en general usan tecnologías que no requieren grandes demandas de energía. Si bien se trató de incorporar una variable *dummy* de San Rafael los modelos no ajustaban bien y siempre resultaba no ser significativa.

En la *Tabla 8* vemos que las PTARs con mejor desempeño son Campo Espejo, Paramillo y San Rafael. Las dos primeras son las más grandes de Mendoza y las que mayor nivel de caudal de efluente pueden recibir sumado a que no presentan tantos problemas de mantenimiento, extracción de lodos, aspectos los cuales son necesarios para el funcionamiento eficiente de este tipo de plantas. San Rafael por otra parte todavía no se encuentra próxima al límite de su capacidad lo que esta influenciando ese alto nivel de eficiencia.

[20] Maximum Likelikehood Estimator

Tabla 8

Valores de eficiencias individuales por planta invariantes en el tiempo

plant	efficiency
campo_espejo	92.9%
costa_araujo	28.7%
junin	11.4%
Palmira	32.9%
paramillo	90.0%
san_martin	88.1%
san_rafael	94.1%
tunuyan	29.3%

Fuente: Output estimación SFA R

Cambio Tecnológico y Eficiencias individuales variantes en el tiempo

$$\ln m_year_{it} = 9.87 - 0.08 \ln kwh_year_{it} + 0.78 \ln ph_y_{it} + v_{it} - u_{it}$$

Tabla 9

Estimación con Cambio Tecnológico y Efecto del Tiempo

Variable	Estimate	Std_Error	z_value	Pr_gt_z
(Intercept)	9.87	0.27	36.09	< 2.2e-16
log(kwh_year)	-0.08	0.01	-6.27	3.59E-10
log(ph_y)	0.78	0.03	24.12	< 2.2e-16
mYear	0.00	0.01	-0.18	0.8592
sigmaSq	0.94	0.48	1.95	0.0508
gamma	0.99	0.00	209.64	< 2.2e-16
time	0.02	0.00	4.11	3.94E-05
log likelihood value				52.00
mean efficiency				0.59

Fuente: Output estimación SFA R.

Los resultados (*Tabla 9*) son muy similares a los del primer modelo, pero con la variable $mYear$ no significativa y $sigmaSq$ apenas no significativa al 5%. La ventaja que tiene incluir el efecto del tiempo es que permite observar la evolución de la eficiencia de las plantas a lo largo del período. La *Tabla 10* muestra que se han mantenido relativamente estables los niveles de eficiencia, es necesario tener en cuenta que el aumento observado esta relacionado con el modo en el que se obtuvieron los datos para ph_y.

Tabla 10[21]

Evolución de la Eficiencia PTARs

Año	Campo Espejo	Costa de Araujo	Junín	Palmira	Paramillo	San Martín	San Rafael	Tunuyán
2010			9%			88%		
2011			9%			88%		
2012			10%			88%		
2013	94%	27%	10%	30%	90%	88%	95%	27%
2014	94%	27%	11%	31%	90%	88%	95%	27%
2015	94%	28%	11%	32%	91%	89%	95%	28%
2016	94%	29%	12%	32%	91%	89%	95%	29%
2017	94%	29%	12%	33%	91%	89%	95%	29%
2018	94%	30%	13%	34%	91%	89%	95%	30%
2019	94%	31%	13%	34%	91%	89%	95%	31%
2020	94%		14%	35%	91%	90%	95%	32%
2021	94%		14%	36%	92%	90%	95%	32%

DEA

Dado que DEA no permite trabajar con datos de panel no balanceados se eliminó Costa de Araujo del análisis y se omitieron los años 2010,2012 y 2013 debido al faltante de datos que presentaban.

Haciendo uso del índice de Malmquist se obtuvieron los niveles de eficiencia tomando como base el año 2013 y se trabajó bajo el supuesto de *CRS*[22]. Se observa de la *Tabla 11* que las plantas que se esperaban que tuvieran un mejor desempeño efectivamente lo tuvieron, pero con una mayor volatilidad a través de los años en contraste con SFA.

Las principales diferencias con SFA se presentan en las plantas de San Martín y San Rafael, donde a la primera de estas mantiene niveles muy inferiores en relación a lo obtenido mediante SFA. Mientras que San Rafael presenta una fuerte caída en el 2018 y de ahí en más empieza a recuperarse.

[21] Los años sin estimaciones corresponden a datos faltantes de kwh_year.
[22] Constants Returns of Scale

Tabla 11

DEA Panel Data con Malmquist Index

Año	junin	san_martin	tunuyan	san_rafael	campo_espejo	paramillo	palmira
2013	7%	53%	46%	100%	100%	100%	59%
2014	7%	53%	33%	124%	93%	87%	46%
2015	7%	53%	28%	112%	93%	96%	44%
2016	7%	53%	32%	125%	95%	116%	43%
2017	8%	53%	33%	122%	98%	97%	44%
2018	8%	54%	38%	29%	98%	89%	41%
2019	9%	53%	37%	40%	93%	91%	40%
2020	10%	54%	42%	45%	98%	77%	42%
2021	10%	54%	41%	47%	99%	86%	37%

Conclusiones

A partir del presente trabajo se pudo plasmar el bajo nivel de eficiencia de las PTARs en Mendoza y no solo desde un aspecto cualitativo como fueron las respectivas visitas.

Los resultados indican que las plantas de Junín, Tunuyán y Palmira son las que requieren de un mayor mantenimiento y nivel de atención teniendo niveles de eficiencia inferiores al 50%. La falta de ampliación ha dificultado cada vez más el nivel de tratamiento en parte por el crecimiento de la población y por ende del efluente. La excesiva acumulación de lodos afecta no solo a la cantidad de agua que pueden ingresar a las lagunas sino también a la en la remoción de agentes bacteriológicos y patógenos. Una menor calidad del efluente de salida conlleva a mayores gastos en hipoclorito para poder matar aquellos residuos todavía persistentes afectando a los cultivos que se riegan con agua de rehúso.

Con respecto a las plantas con mejor desempeño aún tienen muchos desafíos por superar, ya que parte de sus resultados de eficiencia se deben al cómo se obtienen las estimaciones paramétricas y no paramétrica. Por lo tanto, no hay que tomar un rol pasivo con respecto a lo que queda por hacer en materia de remoción de lodo y ampliación de plantas.

Si vemos el caso de San Rafael resulta clara la caída en la eficiencia del 2018 debido a la transición hacia un nuevo treatment train (lagunas facultativas a lagunas aireadas) a partir de ahí se comienza a recuperar rápidamente con respecto al año base, sin embargo, queda esperar si este cambio de tecnología resulta positivo o no. Las lagunas aireadas demandan una gran cantidad de energía y se mostró que la diferencia entre el consumo de una tecnología y otra es muy grande llegando a superar por mucho el Campo Espejo y Paramillo que son las que más efluente reciben. De forma lógica el mayor consumo de kwh viene acompañado de un alto gasto en electricidad, requiere un mayor nivel de empleados y de gastos de operación y mantenimiento, pudiendo afectar seriamente la eficiencia económica de AySAM S.A.

Las estimaciones de SFA nos llevan a que estaría existiendo un gasto excesivo de energía siendo que la mayoría de estas no necesitan grandes cantidades de kwh para funcionar, incluso afectando negativamente. Este es un punto sobre el cual se podría replantear el diseño/ampliación de futuras PTARs. Con respecto a la cantidad de horas de trabajo puede que se este subestimando su efecto sobre $m3_year$ debido a que *Poseidon* realiza una estimación en base a grandes plantas de tratamiento de todo el mundo.

Tal como se mencionó en los antecedentes, una de las formas de llevar a cabo el análisis es poniendo el foco en la eficiencia de la remoción de químicos, pero dada los escases de datos no fue posible analizarlo, sin duda alguna es un punto a tener en cuenta en el futuro.

Continuando con el marco del proyecto, *"Economía Circular y Transición Energética en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales",* la presente tesis acompaña la idea de la necesidad una mayor circularidad en el proceso. Un gran paso para garantizar el correcto funcionamiento de las plantas es darle valor económico al agua de rehúso para poder retribuirle algo más al proceso que solamente los terrenos por convenio para la construcción de los establecimientos y poder pasar a tecnologías que aparentan ser más eficientes o de mayor escalabilidad (por ejemplo, lagunas aireadas). Además, darles un uso a los lodos para abaratar los costos de extracción y también los de energía a partir del uso de biodigestores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aigner, D. J., Lovell, C. A. K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. Journal of Econometrics, 6(1), 21-37. https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5

Bailey, E. E., & Baumol, W. J. (1989). Deregulation and the Theory of Contestable Markets. Yale Journal on Regulation, 1, 111–137.

Battese, G. E., & Coelli, T. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empirical Economics*, *20*(2), 325-332. https://doi.org/10.1007/bf01205442

Baumol, W. J. (1977). "On the Proper Cost Tests for Natural Monopoly in a Multiproduct Industry." American Economic Review, 67(5), 809-822.

Demsetz, H. (1968). Why Regulate Utilities? The Journal of Law & Economics, 11(1), 55–65. http://www.jstor.org/stable/724970

Charnes, A., Cooper, W. E., & Rhodes, E. J. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 2(6), 429-444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

Farrell, M. J. (1957). The Measurement of Productive Efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 120(3), 253–290. https://doi.org/10.2307/2343100

G. (2023c). *Econometria* (5.ª ed.). MCGRAW HILL EDDUCATION.

Henningsen, A. (2019): Introduction to Econometric Production Analysis with R. Collectionof Lecture Notes. 4th Draft Version. Department of Food and ResourceEconomics, Universityof Copenhagen. Available at http://leanpub.com/ProdEconR/.

Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2009). Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach. *Desalination*, *249*(1), 230-234. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.029

Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M., & Sala-Garrido, R. (2011). Cost modelling for wastewater treatment processes. Desalination, 268(1-3), 1-5. https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.042

Kumbhakar, S. C., Parmeter, C. F., & Zelenyuk, V. (2020). *Stochastic Frontier Analysis: Foundations and Advances I.* En Springer eBooks (pp. 1-39).

https://doi.org/10.1007/978-981-10-3450-3_9-1

Molinos-Senante, M., & Maziotis, A. (2021d). Productivity growth, economies of scale and scope in the water and sewerage industry: The Chilean case. *PLOS ONE*, *16*(5), e0251874. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251874

Oertlé, E., Hugi, C., Wintgens, T., & Karavitis, C. (2019). Poseidon—Decision Support Tool for Water Reuse. Water, 11(1), 153. https://doi.org/10.3390/w11010153

Riera, F. S. (2018). *Technical and Environmental Efficiency of Grapevine Production in Mendoza, Argentina* [Disertación de Doctorado]. Faculty of Agricultural Sciences, Georg-August-Universität Göttingen, Germany.

Strande, L., Brdjanovic, D., & Ronteltap, M. (2014). *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. IWA Publishing (Intl Water Assoc).

Tilley, E. (2011). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento.*

Tirole, J. (1988). The Theory of Industrial Organization. MIT Press.

Wen, C., & Lee, C. (1999d). Development of a cost function for wastewater treatment systems with fuzzy regression. *Fuzzy Sets and Systems*. https://doi.org/10.1016/s0165-0114(97)00284-4

Wooldridge, J. M. (2003). Wooldridge, J. M.: Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data. *Journal of Economics.*

Zadeh, L. A. (1965). 1965 J(Zadeh) Fuzzy Sets.pdf. Information and Control, 8, 338–353.

DECLARACIÓN JURADA RESOLUCIÓN 212/99 CD

El autor de este trabajo declara que fue elaborado sin utilizar ningún otro material que no haya dado a conocer en las referencias que nunca fue presentado para su evaluación en carreras universitarias y que no transgrede o afecta los derechos de terceros.

Mendoza, 1 de diciembre 2023

Marcos Ayende

.....

Firma y aclaración

31091

.....

Número de registro

42064255

.....

DNI