

Modelos determinístico y probabilístico para la estimación de la carga de nitratos en una cuenca rural

Deterministic and probabilistic models for the estimation of nitrate loads in a rural basin

Mónica E. Gelmi ¹, Rafael S. Seoane ^{1,2}

Originales: Recepción: 21/02/2013 - Aceptación: 30/08/2013

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un modelo probabilístico que utiliza la teoría de la función de densidad de probabilidades derivada para estimar la carga media anual de nitratos transportada por el escurrimiento superficial, utilizando una relación funcional entre el escurrimiento y la carga de nitratos. El modelo determinístico hidrológico y de calidad de agua denominado Simulator for Water Resources in Rural Basins - Water Quality (SWRRB-WQ) fue utilizado para estimar la carga de nitratos en el escurrimiento superficial. Este modelo emplea como variable de entrada la precipitación diaria observada en la Estación del Aeropuerto de Olavarría durante el período 1988 a 2002. Para la calibración del modelo se aplicó una nueva metodología que estima la incertidumbre en los valores observados. Ambos modelos probabilístico y determinístico se aplican en una subcuenca rural del arroyo Tapalqué (provincia de Buenos Aires, Argentina) y finalmente se comparan los valores de la carga de nitratos estimados con los dos modelos con las observaciones realizadas en la sección del arroyo motivo de este estudio. Los resultados muestran que la carga media de nitratos obtenida con el modelo probabilístico es del mismo orden de magnitud que los valores medios observados y estimados con el modelo hidrológico y de calidad de agua SWRRB-WQ.

ABSTRACT

In this work a new probabilistic model was developed. The new model applies the derived density function theory to estimate nitrate mean annual load transported by surface runoff. A functional relationship between runoff and nitrate load was used. The deterministic hydrologic and water quality model Simulator for Water Resources in Rural Basins - Water Quality (SWRRB-WQ) was used to estimate nitrate load in surface runoff. This model uses, as input variable, daily precipitation observed at Olavarría Airport Meteorological Station, for the 1988-2002 period. For model calibration a new method that estimates uncertainty in observed values is applied. Both probabilistic and deterministic hydrologic models are applied in a rural subbasin of Tapalqué River (province of Buenos Aires, Argentina). Finally, estimated and observed nitrate loads are compared at the outlet section of the subbasin under study. The results of applying the selected probabilistic model show that the mean nitrate loads obtained, are of the same order of magnitude that the mean nitrate loads observed and estimated with the SWRRB-WQ hydrologic and water quality model.

-
- 1 Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Avda. Aristóbulo del Valle 5737. Olavarría. Argentina. (B7400JWI). mgelmi@fio.unicen.edu.ar
 - 2 Inst. Nac. del Agua. Fac. de Ingeniería, UNBuenos Aires (FIUBA-CONICET). Autopista Ezeiza-Cañuelas, tramo J. Newbery km 1620. C. C. N° 46. (1802) Ezeiza. Buenos Aires. Argentina. rseoane@na.gov.ar

Palabras clave

modelo determinístico • modelo probabilístico • carga de nitratos

Keywords

deterministic model • probabilistic model • nitrate load

INTRODUCCIÓN

En las cuencas rurales donde predominan las actividades agrícola-ganaderas y se aplican fertilizantes nitrogenados y fosforados en los cultivos de tipo extensivo, es muy probable que estos productos agroquímicos deterioren la calidad de las aguas subterráneas y superficiales.

Para estudiar el efecto que produce en la calidad del agua la aplicación de fertilizantes en cuencas rurales, se han desarrollado modelos hidrológicos y de calidad de agua determinísticos, determinísticos-probabilísticos e índices de calidad.

El modelo hidrológico y de calidad de agua continuo denominado Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) fue desarrollado por Hunter y Walton (8) para estudiar el transporte de sedimentos, fósforo y nitrógeno en el escurrimiento teniendo en cuenta el tipo y uso de suelos, en una cuenca rural de Australia con una superficie de 1602 km², pendientes moderadas y con un gradiente en la precipitación media anual entre 1673 mm y 3545 mm.

El modelo hidrológico y de calidad de agua denominado Soil Water Assessment Tool (SWAT) fue desarrollado por Santhi *et al.* (12) en una cuenca de Texas Estados Unidos con el propósito de estudiar el impacto que tienen distintos planes de uso y manejo del suelo sobre el transporte de sedimentos y nutrientes en el escurrimiento. El SWAT utiliza un sistema de información geográfica que requiere de un modelo digital de elevación de la zona de estudio a partir del cual se determina la red de drenaje, los límites de cuenca y subcuencas y también admite superponer mapas de tipo y uso del suelo de la cuenca.

Khakbaz *et al.* (9) analizaron en la cuenca del río Illinois distintas estrategias de calibración para un modelo hidrológico semidistribuido, que utiliza las ecuaciones propuestas por el modelo National Weather Service Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) y la información geomorfológica la obtuvieron aplicando el modelo ArcView HEC-GEOHMS.

La revisión bibliografía presentada muestra que los modelos hidrológicos y de calidad de agua determinísticos, para su aplicación en cuencas rurales, requieren información muy detallada de las variables hidrometeorológicas, geomorfológicas y de calidad de agua.

Por lo expuesto en los últimos párrafos es importante estimar la carga de nitratos en cuencas rurales con un modelo simple, con el propósito de establecer niveles de aplicación que sean útiles para los cultivos y que no afecten la calidad del agua de ríos y arroyos.

En este trabajo de investigación se aplicó la teoría de la función densidad de derivada para estimar la carga de nitratos transportada por el escurrimiento superficial en una cuenca rural a partir de la intensidad y duración media de la precipitación, teniendo en cuenta una relación entre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos propuesta por Eisele y Leibundgut (2). Finalmente, se comparan los valores medios observados y obtenidos con los modelos determinístico y probabilístico.

Objetivo

- Desarrollar un modelo probabilístico para estimar la carga media anual de nitratos; se aplicó la teoría de la función de densidad derivada (1) que tiene en cuenta la función de densidad de probabilidades conjunta de la intensidad y la duración efectiva de la precipitación (10) y la relación funcional entre la carga de nitratos y el escurrimiento superficial (2).

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo probabilístico

Se utiliza el concepto de la teoría de la función de densidad de probabilidades derivada (1) para obtener la función de densidad de probabilidades acumulada y el momento de primer orden de la carga de nitratos que es transportada en una cuenca rural para un evento de precipitación y acumulada en escala de tiempo anual.

La relación funcional entre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos (2) se expresa en la ecuación [1]:

$$C = C_o \frac{Q_s}{F_c} M_c \quad [1]$$

donde:

C = carga de nitratos transportada por el escurrimiento superficial, kg/ha

C_o = carga de nitratos inicial, kg/ha

Q_s = escurrimiento superficial, mm

F_c = capacidad de campo, mm

M_c = coeficiente de movilidad

La función de distribución acumulada de la carga de nitratos se estimó a partir de la función de densidad conjunta de la intensidad y duración efectiva de la precipitación (10) y resulta igual a:

$$F_C(c) = \int_0^{\infty} dt_e \int_0^a f_{I_e, T_e}(i_e, t_e) di_e \quad [2]$$

donde:

$$a = \frac{1}{t_e} \left(\frac{c' F_c}{C_o M_c} \right) \quad [3]$$

$f_{I_e, T_e}(i_e, t_e)$ = función de densidad de probabilidades conjunta de la intensidad y duración efectiva de la precipitación.

La ecuación [2] (pág. 247) se resuelve con respecto a la intensidad y duración efectiva, reemplazando el valor de "a" y sumando el término que corresponde a la probabilidad de intensidad y duración efectiva igual a cero, se obtiene:

$$F_C(c) = -2.35835 \exp(-\sigma) \Gamma(\sigma+1) \sigma^{-\sigma} (\beta^* S^{0.44161} \lambda)^{1/2} \left(\frac{c' F_c}{C_o M_c} \right)^{0.27915}$$

$$K_1 \left(2.35835 (\beta^* S^{0.44161} \lambda)^{1/2} \left(\frac{c' F_c}{C_o M_c} \right)^{0.27915} \right) + 1 \quad [4]$$

donde:

K_1 = función modificada de Bessel de primer orden

$$\sigma = 2.35835 (\beta^* S^{0.44161} \lambda)^{1/2}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$\beta^* = \frac{\beta}{K}$$

$$K = 1 - \exp(-1.1\lambda^{-0.25}) + \exp(-1.1\lambda^{-0.25} - 0.003861A)$$

A = área de la cuenca, km²

K_* = factor que transforma la precipitación puntual en precipitación media sobre la cuenca

β = inversa de la intensidad media de la precipitación en el área de la cuenca, hora/mm

S = coeficiente de almacenamiento, mm

CN = número de curva

λ = inversa de la duración media de la precipitación, 1/hora

La ecuación [4] representa la función de distribución acumulada de la carga de nitratos obtenida a partir de la intensidad y duración media de la precipitación y de la condición antecedente de humedad.

El momento de primer orden de la carga de nitratos transportada por el escurrimiento superficial para eventos de precipitación se expresa en la ecuación [5].

$$E(C) = \int_0^{\infty} (1 - F_C(c)) dc \quad [5]$$

Para resolver la integral de la ecuación [5] se reemplaza la función de distribución acumulada de la carga de nitratos obtenida, ecuación [4]. La ecuación [5] se resuelve en forma numérica utilizando una rutina del software Mathematical and Statistical Libraries for Windows (IMSL), versión 2.0.

La media de la carga de nitratos transportada por el escurrimiento, en una escala de tiempo anual, resulta:

$$E(C) = \nu t E(C_j) \quad [6]$$

donde:

ν = número medio de eventos en un año

C_j = carga de nitratos transportada a nivel de evento, variable aleatoria independiente e idénticamente distribuida

El número medio de eventos independiente en un año, la intensidad y duración media de los mismos se determinaron a partir del registro histórico de precipitaciones correspondiente a la estación del Aeropuerto de Olavarría, durante agosto a diciembre para el período 1988 a 1997.

La carga de nitratos inicial contenida sobre la superficie de la cuenca, la cual estaría disponible para ser transportada por el escurrimiento superficial, se definió teniendo en cuenta las recomendaciones de la Oficina de Extensión del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Olavarría, provincia de Buenos Aires, Argentina.

Modelo determinístico

El modelo denominado Simulator for Water Resources in Rural Basins - Water Quality (SWRRB-WQ) (17) es un modelo continuo hidrológico y de calidad de agua que simula el escurrimiento y el transporte de fertilizantes y pesticidas en una cuenca rural. El modelo hidrológico se fundamenta en una ecuación básica de balance de agua en una cuenca, la cual es:

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_i - ET_i - O_i - QR_i) \quad [7]$$

donde:

SW_t = contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua en el punto de marchitez

P_i = altura de la precipitación, mm

Q_i = escurrimiento superficial, mm

ET_i = evapotranspiración, mm

O_i = percolación, mm

QR_i = escurrimiento subsuperficial, mm

El modelo estima el volumen de escurrimiento superficial a partir de la ecuación modificada del Número de Curva (14) y utiliza para el cálculo del transporte de sedimentos debido a la erosión del suelo la ecuación denominada "Modified Universal Soil Loss Equation" (MUSLE) (15). Las expresiones que representan matemáticamente el transporte y el ciclo de los fertilizantes corresponden al modelo denominado Erosion- Productivity Impact Calculator (EPIC) (16), con algunas modificaciones realizadas por los autores del modelo SWRRB-WQ.

El modelo SWRRB-WQ se aplicó en la cuenca del arroyo Tapalqué y el nivel de ajuste alcanzado en las variables escurrimiento superficial y carga de nitratos se determinó aplicando el método propuesto por Harmel *et al.* (6, 7). Con este método se

estimó la incertidumbre en los valores medios observados del escurrimiento superficial y la carga de nitratos a partir de los errores que se comenten en las técnicas utilizadas para: a) medir el caudal; b) recolectar muestras de agua; c) conservar y almacenar las muestras; d) análisis químicos.

Características de la cuenca

La cuenca del arroyo Tapalqué tiene una superficie de 1560 km², pendientes medias entre 1,2 a 5,0‰, precipitación media anual de 941,5 mm y temperatura media de 15,2°C (Estación Meteorológica del Aeropuerto de Olavarría, 1988 - 2002).

La subcuenca tiene una superficie de 320,6 km², pendiente promedio de 1,3‰ y tiempo de concentración de aproximadamente treinta y siete horas. La superficie sembrada representa aproximadamente un 63% del área total de la subcuenca (4).

La ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Tapalqué en la provincia de Buenos Aires, Argentina, se presenta en la figura 1.

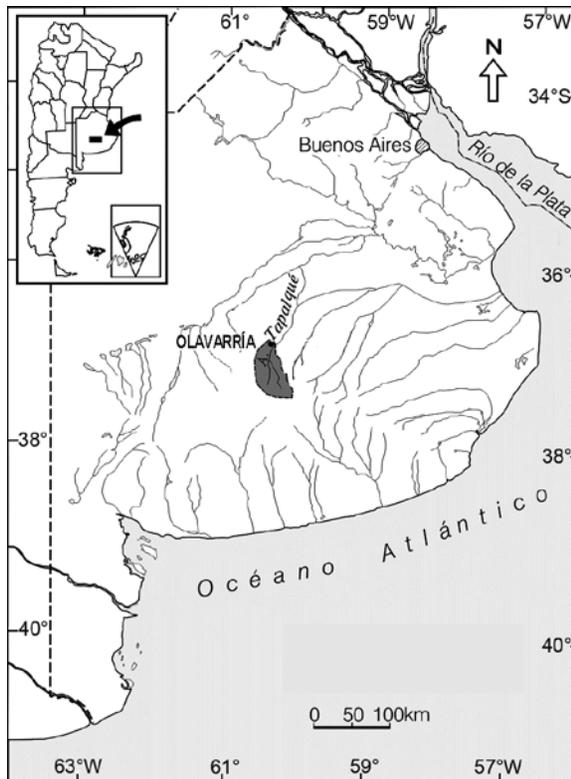


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Tapalqué.
(Provincia de Buenos Aires, Argentina).

Figure 1. Geographic location of the Tapalqué river basin.
(Province of Buenos Aires, Argentina).

Carga de nitratos y escurrimiento superficial

La metodología utilizada para la obtención de las muestras de agua en la sección de control y la estimación de las variables observadas carga de nitratos y escurrimiento superficial, en escala de tiempo mensual y anual, se explican detalladamente en Gelmi (4) y en Gelmi y Seoane (5).

RESULTADOS

Carga de nitratos observada

En la sección de control del arroyo Tapalqué correspondiente al cierre de la subcuenca se realizaron observaciones de muestras de agua y se convirtió la concentración de nitratos (mg/l) a carga diaria (kg/ha) (4).

La figura 2 muestra los valores de la carga de nitratos observados en escala de tiempo mensual.

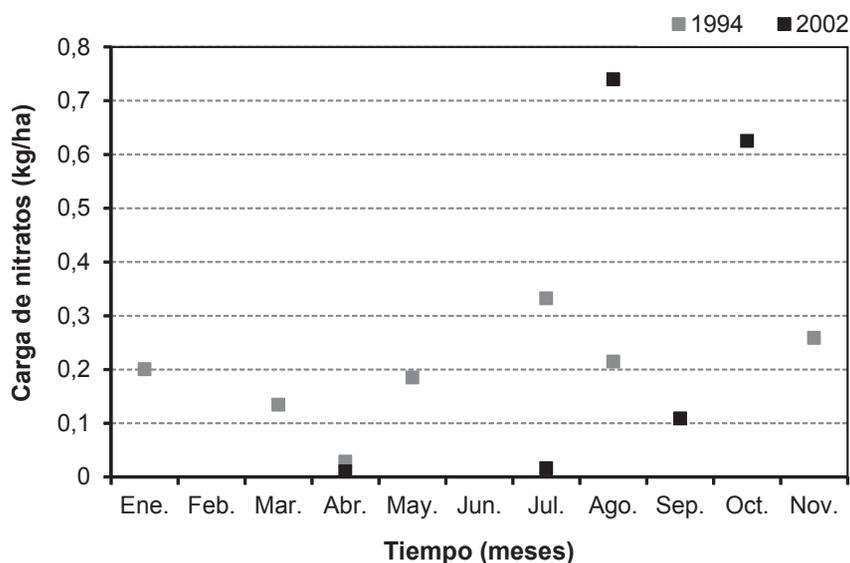


Figura 2. Carga de nitratos observada en la sección de control.

Figure 2. Observed nitrate load in the control section.

Calibración del modelo determinístico

Las figuras 3 y 4 (pág. 252) muestran los valores calibrados del escurrimiento superficial y de la carga de nitratos y el nivel de incertidumbre asociado a los valores medios de ambas variables observadas para los meses de agosto a noviembre en que se aplica el fertilizante en la cuenca bajo estudio (3).

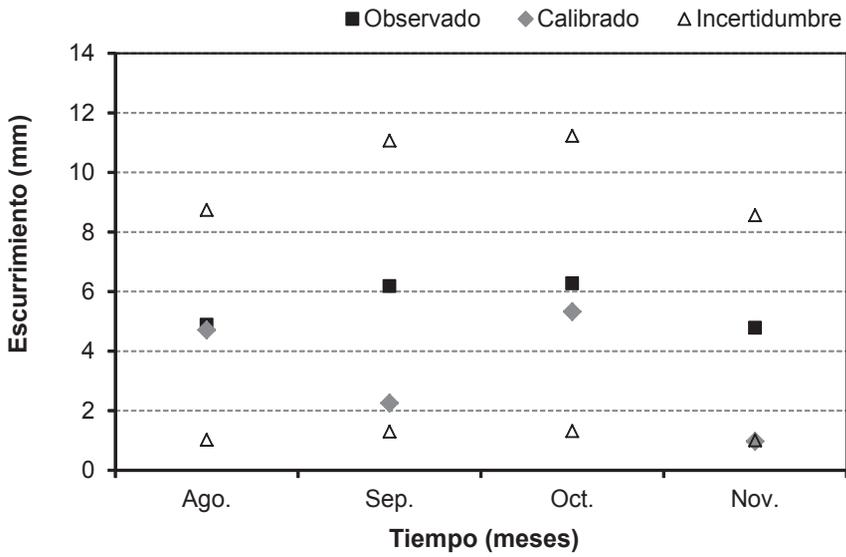


Figura 3. Esgurrimiento superficial.
Figure 3. Surface runoff.

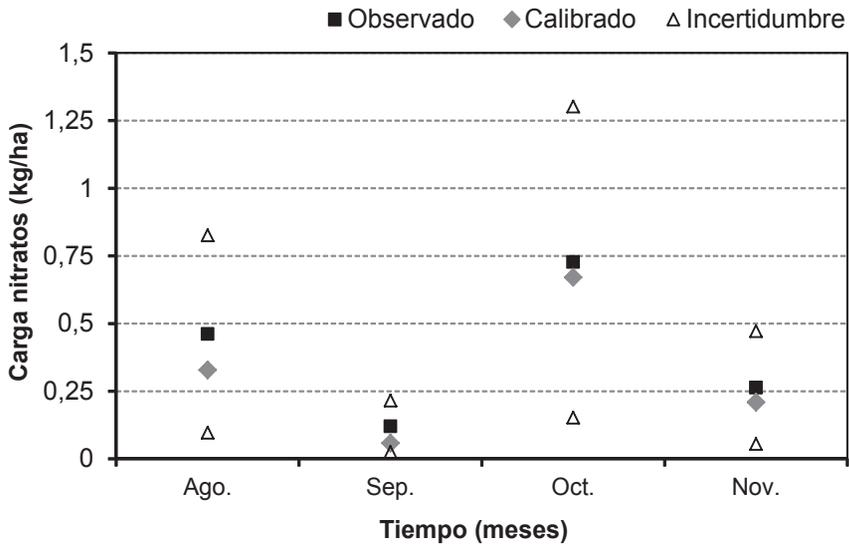


Figura 4. Carga de nitratos.
Figure 4. Nitrate load.

Los caudales y la carga de nitratos estimados por el modelo determinístico SWRRB-WQ se sitúan dentro del rango de error calculado para los meses de agosto a noviembre.

Estimación de la carga de nitratos con el modelo probabilístico. Comparación de los valores observados y estimados

Para la estimación de la carga de nitratos con el modelo probabilístico se adoptó el siguiente escenario: la primera aplicación de fertilizante con fosfato diamónico se realizó aproximadamente a fines de julio, en el momento de la siembra y a mediados de octubre, en la etapa de macollaje, con urea. Si se aplican 67,8 kg/ha de nitrógeno, de los cuales 46,6 kg/ha corresponden a la urea y 21,2 kg/ha al fosfato diamónico, equivale a decir que se han aplicado en total 300,4 kg/ha de nitratos.

Este escenario considera que del total de nitrato aplicado un 17% del mismo estaría disponible para escurrir ya sea superficialmente o como escurrimiento base, resultando entonces la siguiente carga inicial de nitratos: 51,1 kg/ha.

Con respecto al tipo de suelo y al número de curva (NC) para una condición antecedente de humedad II (SCS), se identificó para la subcuenca motivo de este estudio: loam y NC = 70. La capacidad de campo para un tipo de suelo loam se adoptó en un valor de 0,193 cm³/cm³ y el coeficiente de movilidad es igual a 0,0011 (ecuación [1], pág. 247).

El número de eventos independientes por año, la duración e intensidad media de la precipitación, son iguales a: 3,92 h y 9,86 mm/h, respectivamente (4, 5).

En la siguiente tabla se presentan los valores observados y estimados por ambos modelos (probabilístico y determinístico).

Tabla. Comparación de los valores medios de la carga de nitratos en escala de tiempo anual.

Table. Comparison of mean nitrate load values, annual time scale.

Comparación valores medios	Carga de nitratos (kg/ha)
Observado	2,94
Modelo SWRRB-WQ	2,19
Nuevo modelo	2,52

La carga de nitratos estimada con el nuevo modelo probabilístico que utiliza la relación de (2), es un 14% menor que el valor observado. En cambio, con el modelo determinístico la diferencia es de un 26% menor.

Otro resultado interesante indica que la utilización de fertilizantes nitrogenados en cuencas rurales y su transporte con el escurrimiento superficial afectan la calidad del agua de los ríos y arroyos. En este caso de estudio, para una escala de tiempo anual, no se observó que se superaran los valores estándares a nivel nacional e internacional (11, 13).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un nuevo modelo probabilístico que representa la carga de nitratos que se transporta con el escurrimiento superficial en cuencas rurales. Este modelo utiliza como variables de entrada la intensidad y duración de la precipitación y el uso del suelo según la clasificación del Soil Conservation Service, que son normalmente accesibles. También esta solución es más sencilla que la obtenida con un modelo determinístico de mayor complejidad ya que este requiere información hidrometeorológica y geomorfológica muy detallada.

Los resultados muestran que el valor de la carga media de nitratos obtenida con el nuevo modelo probabilístico es del mismo orden de magnitud que los valores observados y obtenidos con el modelo SWRRB-WQ.

La aplicación y el análisis de los resultados del modelo SWRRB-WQ, en escala diaria, mostró que el intervalo de tiempo entre la aplicación del fertilizante y el momento en que sucede la precipitación, la condición antecedente de humedad, la altura de precipitación y el contenido de nitratos en el suelo tienen relación con la carga de nitratos en el escurrimiento superficial.

Cabe destacar que en este caso de estudio, los valores de la carga de nitratos en escala de tiempo anual no superan los estándares nacionales e internacionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Benjamin, J. R.; Cornell, C. A. 1970. Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. EE.UU. Ed. McGraw-Hill Book Company. 684 p.
2. Eisele, M.; Leibundgut, C. 2002. Modelling nitrogen dynamics for a mesoscale catchment using a minimum information requirement (MIR) concept. *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*. 47(5): 753-768.
3. Gelmi, M. E. 2005. Aplicación de modelos determinístico y probabilístico para el análisis de un fertilizante en una cuenca rural. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. Argentina. 191 p.
4. Gelmi, M. E.; Seoane, R. S. 2004. Aplicación de un modelo de calidad de agua y definición de criterios para el monitoreo de un fertilizante en una cuenca rural. *Revista Ingeniería del Agua*. España. 11(4): 411- 424.
5. Gelmi, M. E.; Seoane, R. S. 2012. Estimación de la carga de nitratos en una cuenca rural y su relación con la variabilidad climática. *Tecnología y Ciencias del Agua*. México. III(3): 21-34.
6. Harmel, R. D.; Cooper, R. J.; Slade, R. M.; Haney, R. L.; Arnold, J. G. 2006. Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 49(3): 689-701.
7. Harmel, R. D.; Smith, P. K. 2007. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*. 337(3-4): 326-336.
8. Hunter, H. M.; Walton, R. S. 2008. Land-use effects on fluxes of suspended sediment, nitrogen and phosphorus from a river catchment of the Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Hydrology*. 356(1-2): 131-146.
9. Khakbaz, B.; Imam, B.; Hsu, K.; Sorooshian S. 2012. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*. 148-419: 61-77.
10. Raines, T.; Valdés, J. B. 1993. A derived flood frequency distribution for ungaged catchments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(10): 138-1154.

11. Ritter, W. F.; Shirmohammadi, A. 2001. Agricultural NonPoint Source Pollution. Watershed Management and Hydrology. EE.UU. Ed. Lewis Publishers. 342 p.
12. Santhi, C.; Srinivasan, R.; Arnold, J. G.; Williams, J. R. 2006. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. Environmental Modelling & Software. 21: 1141-1157.
13. Steinheimer, T. R.; Scoggin, K. D. 1998. "Agricultural chemical movement through a field-size watershed in Iowa: surface hydrology and nitrate losses in discharge". Environmental Science and Technology. 32(8): 1048-1052.
14. USDA-SCS. 1972. United States Department of Agriculture-Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters: 4-10.
15. Williams, J. R.; Berndt, H. D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. ASAE. 20(6): 1100-1104.
16. Williams J. R.; Jones C. A.; Dyke P. T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27: 129-144.
17. Williams, J. R.; Nicks, A. D.; Arnold, J. G. 1985. Simulator for Water Resources in Rural Basin. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. 111(6): 970-986.

Agradecimientos

Al Lic. Oscar Díaz y a la Prof. Viviana Colasurdo
quienes realizaron el análisis de muestras de agua del arroyo Tapalqué.

Al Ing. Hugo Santonja y a la Ing. Lía Oyesqui
del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria con sede en Olavarría
por la información recibida y sus valiosos comentarios.

A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Centro
de la Provincia de Buenos Aires, por los subsidios recibidos.