

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

Mónica E. Gelmi⁽¹⁾ y Rafael S. Seoane^{(1) (2)}

Resumen:

El objetivo de este trabajo consiste en aplicar el modelo de calidad de agua denominado Simulator Water Resources in Rural Basins - Water Quality (SWRRB-WQ) asociado a un modelo de generación de variables hidrometeorológicas, Richardson (1981), para estimar la masa de fertilizante nitrogenado transportado por el escurrimiento superficial en una subcuenca del arroyo Tapalqué (Provincia de Buenos Aires, Argentina).

Se diseña un plan de experimentos con el propósito de definir las principales características de un programa de muestreo para estudiar la carga de nitratos que se encuentra asociada con la aplicación del fertilizante nitrogenado en una subcuenca que tiene una superficie sembrada de aproximadamente 202 km².

Con el propósito de simular la altura de la precipitación diaria, variable de entrada del modelo hidrológico y de calidad de agua, se propone seleccionar el modelo estocástico más adecuado entre las funciones de densidad de probabilidades: Gamma, Log-Normal II, Log-Normal III y Exponencial, a partir de la aplicación de los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y de Cramer-von Mises.

Un objetivo importante es estimar la carga de nitratos en la sección del arroyo Tapalqué correspondiente al cierre de la subcuenca motivo de estudio para distintos escenarios de aplicación del fertilizante nitrogenado en distinta magnitud asociado a diferentes trazas sintéticas de variables hidrometeorológicas a partir del modelo de generación de variables hidrometeorológicas, Richardson (1981).

A partir de las simulaciones realizadas, se estima la función de correlación cruzada entre la altura de la precipitación y la carga de nitratos contenida en el escurrimiento que permite definir el tiempo medio de retardo entre ambas variables. Este resultado es importante ya que define el período de tiempo posterior a la ocurrencia del evento de precipitación, para el cual sería importante intensificar los muestreos en la sección del arroyo Tapalqué correspondiente al cierre de la subcuenca en estudio.

Palabras clave: modelos hidrológicos y de calidad de agua, modelo de precipitación, nitratos.

INTRODUCCIÓN

El control de los contaminantes derivados de la aplicación de fertilizantes en una cuenca rural hace necesario realizar estudios por distintas razones. Entre las principales se encuentran la necesidad de estimar la masa de nitratos en el agua a medida que nuevos sectores de tierras van siendo incorporadas al sistema productivo y la importancia de identificar el período del año para el cual es fundamental incrementar los muestreos para conocer con mayor precisión la masa del contaminante que se encuentra en el curso de agua.

Montgomery y Kennedy (1985), estudiaron las relaciones entre variables de calidad e hidrológicas para catorce eventos de tormenta y en especial el comportamiento asociado con los hidrogramas de crecidas, observando que determinadas variables de calidad aumentan su concentración e inversamente otras se diluyen a medida que el caudal se aproxima al caudal máximo.

Novotny *et al.* (1994) desarrollaron un modelo determinístico hidrológico y de calidad de agua,

(1)Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Avda. A. Del Valle 5737 (7400) Olavarría. mgelmi@fio.unicen.edu.ar

(2)Instituto Nacional del Agua, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

Artículo recibido el 9 de febrero de 2004, recibido en forma revisada el 5 de agosto de 2004 y aceptado para su publicación el 17 de septiembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

y aplicaron una técnica de simulación, para estudiar la incertidumbre de las variables de calidad de agua en una cuenca urbana compuesta por un tramo de río y una presa. En este trabajo se compararon las funciones de densidad de probabilidades de las concentraciones de distintos contaminantes con los valores estándares de los mismos utilizados en los Estados Unidos.

Steinheimer y Scoggin (1998) determinaron que de la cantidad total de nitrógeno aplicado en la cuenca, un 50 % es utilizado por el cultivo, un 30 % es almacenado en el suelo o perdido, un 16.1 % es observado en el caudal base, un 1.1 % es observado en el caudal directo y el 1.8 % restante se encuentra adherido a los sedimentos. Otro resultado importante muestra que durante un evento de crecida, para una escala de tiempo horaria, la carga de nitratos está asociada linealmente con el escurrimiento superficial.

La variabilidad espacial y temporal de la variable altura de la precipitación es importante para cuantificar la masa de fertilizante que es transportada por el escurrimiento superficial en una cuenca rural. En este sentido Chaubey *et al.* (1999) estudiaron el efecto que produce la variabilidad espacial de la precipitación en los parámetros de un modelo hidrológico y de calidad de agua (Agricultural NonPoint Source, AGNPS) previamente calibrado para una cuenca rural de 172 km².

La cantidad y calidad de agua en lagos y reservorios está caracterizada por la cantidad y calidad del agua que aporta la cuenca localizada aguas arriba. En ese sentido, es importante estudiar las fuentes no puntuales de contaminación debido a prácticas agrícolas y ganaderas. El modelo conceptual desarrollado por Viney *et al.* (2000) tiene la capacidad de simular el transporte de fertilizantes en cuencas rurales y en los cursos de agua.

Hyer *et al.* (2001) analizaron el transporte de un herbicida (atrazina) y fertilizantes en una pequeña cuenca rural, que tiene una superficie de 1.2 km², para tres eventos de crecidas ocurridos durante un año de trabajo. Determinaron que la carga de atrazina en el escurrimiento fue variable y que la carga de nitratos es observada varias horas después de la ocurrencia de la precipitación.

Varanou *et al.* (2002) utilizaron el modelo hidrológico y de calidad de agua denominado Soil and Water Assessment Tool (SWAT) con el objetivo de simular el escurrimiento y la carga de nitrógeno en

una cuenca rural para distintos escenarios de cambio climático. Los resultados obtenidos indican que una disminución en la precipitación implica una reducción en el escurrimiento superficial y en la carga de nitratos.

El análisis de los antecedentes indica la importancia de establecer formas sistemáticas de observación para estudiar la evolución temporal de las distintas variables de calidad de agua y de las amplias posibilidades de aplicar modelos matemáticos que incluyen la asociación entre modelos hidrológicos y de calidad de agua para el estudio del transporte de contaminantes en cuencas y su utilidad para definir las características principales de un plan de muestreo en una cuenca rural.

METODOLOGÍA

Los objetivos de este estudio consisten en estimar la carga de nitratos asociada con distintos escenarios de aplicación de un fertilizante nitrogenado y definir las características de un plan de muestreo adecuado en una sección del arroyo Tapalqué (Provincia de Buenos Aires, Argentina) correspondiente al cierre de una subcuenca rural.

En esta investigación se aplica el modelo SWRRB-WQ con el propósito de estudiar la asociación entre el escurrimiento superficial y la cantidad de fertilizante nitrogenado transportado por el mismo. El modelo SWRRB-WQ está constituido básicamente por una representación determinística compleja, hidrológica y de calidad de agua, y con un modelo probabilístico de generación de variables hidrometeorológicas (Richardson, 1981).

El plan de simulación propuesto consiste en generar trazas sintéticas de variables hidrometeorológicas a partir del modelo de generación de variables hidrometeorológicas, Richardson (1981), que incluye el modelo Gamma para la generación de la altura de precipitación porque es el más adecuado para simular, en escala diaria, la variable altura de la precipitación según los resultados de las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov y de Cramer-von Mises. Estas trazas sintéticas se utilizarán como variable de entrada al modelo calibrado SWRRB-WQ.

Los resultados obtenidos del plan de experimentos, escurrimiento superficial y carga de nitratos, se contrastan con los valores observados en el cierre de la subcuenca en estudio para una escala de tiempo anual.

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

Además, se muestra que existe una asociación entre: a) el escurrimiento superficial - carga de nitratos y b) la altura de la precipitación - carga de nitratos.

Con el propósito de estimar el período de observación de la carga de nitratos, a partir de las series simuladas con el modelo SWRRB-WQ y para una escala de tiempo diaria, se estudia la función de correlación cruzada entre la altura de la precipitación y la carga de nitratos en el escurrimiento superficial. Este resultado se lo contrasta con el obtenido a partir de las observaciones realizadas para dos eventos de crecidas en la sección del arroyo Tapalqué, para el período del año en el cual se aplican los fertilizantes en la cuenca.

CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL ARROYO TAPALQUÉ

La cuenca del arroyo Tapalqué está localizada aproximadamente en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina y está limitada al este por la cuenca del arroyo Azul y al oeste por la cuenca del arroyo Vallimanca.

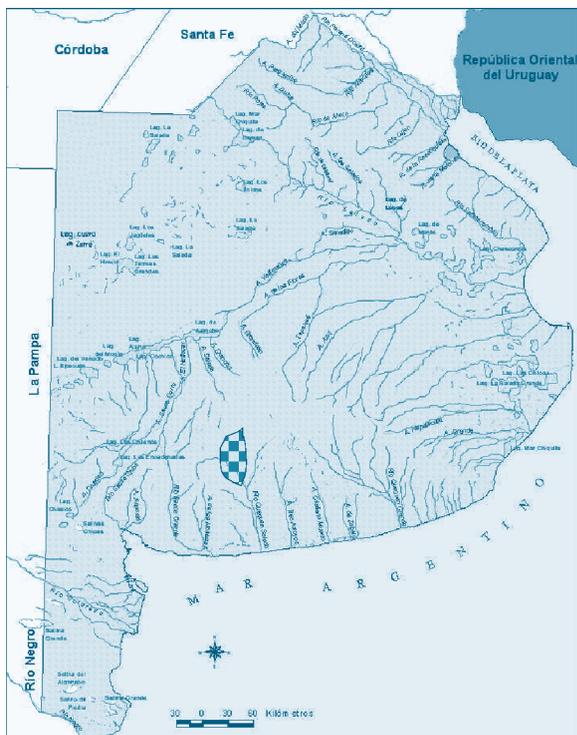


Figura 1 Ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Tapalqué, provincia de Buenos Aires, Argentina

La superficie de la cuenca del arroyo Tapalqué es de 1560 km², con pendientes medias comprendidas entre 1.2 a 5.0 ‰, precipitación media anual de 903.6 mm y una temperatura media de 15.3 °C.

La figura N° 1 muestra la ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Tapalqué en la provincia de Buenos Aires.

La división de la cuenca en subcuencas, en total diez, se realizó a partir de la red de drenaje natural y para cada una de ellas se determinó la superficie, pendiente media y pendiente media del curso.

A partir de cartas del Instituto Geográfico Militar en escala 1:100000 se digitalizó, en el Instituto de Hidrología de Llanuras de Azul, la superficie de la cuenca, las curvas de nivel, los límites de las subcuencas y los cursos de agua, figura N° 2.

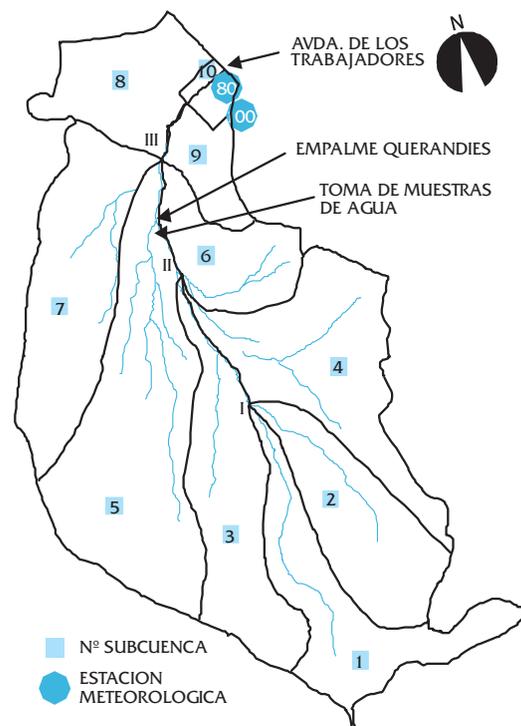


Figura 2 Subcuencas e identificación de las secciones del curso de agua en la cuenca del arroyo Tapalqué

La ubicación del sitio donde se realizan las tomas de muestras de agua corresponde a una sección de control del arroyo Tapalqué ubicada en las proximidades del cierre de la subcuenca 5, figura N° 2, debido a que el área de aporte corresponde solamente a la subcuenca en estudio, presenta una importante superficie sembrada y es fácil de acceder.

La subcuenca 5 tiene una superficie de 320.6 km², con una pendiente promedio de 1.3 ‰ y un tiempo de concentración de treinta y siete horas.

Del análisis de cuatro imágenes satelitales correspondientes a noviembre de 1999, noviembre de 2000, septiembre de 2001 y octubre de 2002 se determina que la superficie sembrada en la subcuenca 5 representa aproximadamente un 63 % del área total de la subcuenca en estudio y un 13 % de la superficie total de la cuenca, figura N° 3.

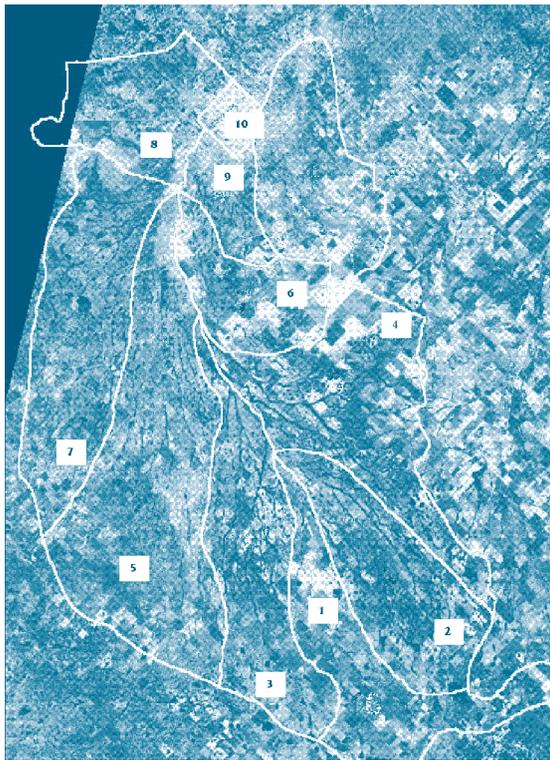


Figura 3 Superficie sembrada en la cuenca del arroyo Tapalqué. 1 a 10 : Número de cada subcuenca correspondiente a la cuenca del arroyo Tapalqué

PRINCIPALES ECUACIONES HIDROLÓGICAS Y DE CALIDAD DE AGUA

El modelo denominado Simulator for Water Resources in Rural Basins - Water Quality (SWRRB-WQ) (Williams *et al.*, 1985) es un modelo continuo hidrológico y de calidad de agua que permite simular el escurrimiento y el transporte de fertilizantes y pesticidas en una cuenca rural. El modelo permite subdividir la cuenca en subcuencas en función del tipo de suelo, precipitación y red de drenaje.

El modelo hidrológico se fundamenta en una ecuación básica de balance de agua en una cuenca. Considera que la precipitación caída debe ser utilizada para evapotranspiración, para el almacenamiento o escurre como flujo en canal o pasa a formar parte del drenaje subterráneo.

A medida que transcurre el tiempo, las condiciones de humedad asociadas con cada componente del modelo de balance de agua son actualizadas en forma continua.

La ecuación de balance de agua es:

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

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 (USDA-SCS, 1972) y utiliza para el cálculo del transporte de sedimentos debido a la erosión del suelo la ecuación denominada "Modified Universal Soil Loss Equation" (MUSLE), Williams y Berndt (1977).

Las expresiones que representan matemáticamente el transporte y el ciclo de los fertilizantes en el modelo SWRRB-WQ corresponden al modelo denominado Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) (Williams *et al.*, 1984), con algunas modificaciones realizadas por los autores del modelo SWRRB-WQ.

Los fertilizantes que permite simular el modelo son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), las presentaciones comerciales de los fertilizantes nitrogenados más utilizadas por los productores agropecuarios de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) para los cultivos de trigo y maíz son urea y fosfato diamónico, (Melgar y Zorita, 1997; INTA, 2000).

Las ecuaciones del modelo estiman el contenido de nitratos en el escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo multiplicando la concentración del mismo por el volumen de agua correspondiente a cada uno de los almacenamientos mencionados para la subcuenca en estudio.

El modelo estima la carga de nitratos diaria, en forma soluble, que transporta el escurrimiento superficial para un espesor de la capa del suelo de 10 mm.

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

La expresión que cuantifica la masa de nitratos transportada en un período de un día es:

$$VNO_3 = WNO_3 \left(1 - \exp\left(\frac{-Q}{PO - WP}\right) \right) \quad (2)$$

donde:

VNO_3 : carga de nitratos diaria transportada por el escurrimiento superficial, tn

Q: volumen de agua superficial diario, mm

WNO_3 : carga de nitratos inicial, tn

PO: porosidad, mm

WP: contenido de agua en el punto de marchitez, mm.

Para estimar el transporte de nitrógeno orgánico contenido en el escurrimiento para cada subcuenca, después de cada evento de precipitación, el modelo utiliza una función desarrollada por McElroy *et al.* (1976) y que posteriormente fue modificada por Williams y Hann (1978).

El modelo SWRRB-WQ simula el consumo de nitrógeno por el cultivo a partir de una simplificación de la ecuación que utiliza el modelo EPIC (Williams *et al.*, 1984), la cual permite estimar el suministro y la demanda de nitrógeno (Monteith, 1977).

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron observaciones de muestras de agua en la sección de control del arroyo Tapalqué correspondiente a la subcuenca 5 motivo de este estudio. Los resultados obtenidos, concentración de nitratos, se presentan en la tabla N° 1.

Con el objetivo de contrastar los resultados estimados por el modelo determinístico SWRRB-WQ con los obtenidos de los análisis de las muestras de agua en la sección del arroyo Tapalqué, se convierte la concentración de nitratos expresadas normalmente en unidad de masa por unidad de volumen a unidad de masa por unidad de superficie, tabla N° 1.

La expresión utilizada para calcular la carga diaria de nitratos es:

$$VNO_3 = \frac{0.864CNO_3QP_q}{A} \quad (3)$$

donde:

VNO_3 : carga de nitratos en el escurrimiento superficial, kg/ha

CNO_3 : concentración de nitratos, mg/l

Q: caudal superficial, m³/s

A: área de la cuenca, km²

P_q : porcentaje de escurrimiento superficial correspondiente a la subcuenca 5 (0.17)

0.864: factor de conversión de unidades.

Tabla 1. Variables de calidad de agua medidas en la sección de control, subcuenca 5

Fecha	Nitratos	Escurrimiento Superficial	Nitratos
	(mg/l)	(mm)	(kg/ha)
12/01/94	11.1	1.27	0.0065
08/03/94	6.2	1.53	0.0043
29/04/94	1.3	1.60	0.0010
31/05/94	7.8	1.67	0.0060
05/07/94	12.2	1.92	0.0107
30/08/94	6.9	2.19	0.0069
01/11/94	8.6	2.19	0.0086
15/04/02	3.2	0.23	0.0003
07/07/02	1.0	1.15	0.0005
28/08/02	4.1	12.79	0.0239
11/09/02	1.4	5.66	0.0036
15/10/02	2.7	16.30	0.0202

Para obtener la carga de nitratos en una escala de tiempo mensual se multiplica a la carga diaria de nitratos por la cantidad de días del mes. La carga de nitratos a nivel anual se obtuvo a partir de la media de los valores mensuales y luego a este valor se lo multiplica por la cantidad de meses del año, tabla N° 2.

Tabla 2 Carga de nitratos en escala anual en la sección de control, subcuenca 5

Año	Nitratos (kg/ha)
1994	2.27
2002	3.60

A partir de los valores medios anuales de la carga de nitratos de la tabla N° 2 se obtiene el valor medio anual para los dos años analizados de: 2.94 kg/ha.

VARIACION DE LOS CAUDALES Y EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

En la sección de cierre de la subcuenca 5, motivo de este estudio, no se dispone de un registro de caudales diarios, entonces se está instalando un limnógrafo con el propósito de medir los tirantes de la superficie de agua y posteriormente se realizarán los aforos necesarios para obtener la curva altura-caudal para esta sección del arroyo Tapalqué.

Con el propósito de obtener valores del caudal y del escurrimiento superficial en la sección de control correspondiente a la subcuenca 5, se calibró y verificó el modelo hidrológico de transformación precipitación-caudal denominado Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) en la sección de cierre de la cuenca del arroyo Tapalqué denominada Avda. de los Trabajadores.

El volumen de escurrimiento superficial se estimó con el modelo de infiltración denominado Número de Curva (NC) desarrollado por el United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1972). Los parámetros de este modelo se estimaron a partir del tipo de suelo hidrológico y la condición de humedad antecedente de la cuenca.

El proceso de transformación volumen de escurrimiento - caudal se representó con el modelo de hidrograma unitario de Clark (1943), cuyos parámetros son: el coeficiente de almacenamiento y el tiempo de concentración. Los valores iniciales del coeficiente de almacenamiento de cada una de las subcuencas se estimaron con la expresión propuesta por Wilson y Brown (1992).

Para realizar la propagación de la onda de crecida entre tramos de canal se utilizó el método de Puls Modificado, el cual requiere la siguiente información: sección transversal del arroyo, longitud del tramo y el coeficiente de Manning. Los tramos de canal se indican en la figura N° 2 y corresponden a las secciones del arroyo Tapalqué denominadas I, II, III y Avda. de los Trabajadores. Los resultados de las simulaciones muestran que no se observan cambios en la forma de los hidrogramas de entrada y de salida correspondientes a cada tramo del arroyo Tapalqué, entonces el almacenamiento en el curso no es significativo.

En la figura N° 4 se muestran los caudales observados y estimados por el modelo HEC-HMS

en la sección de cierre de la cuenca del arroyo Tapalqué denominada Avda. de los Trabajadores para un evento de crecida correspondiente al 28 de agosto de 1992.

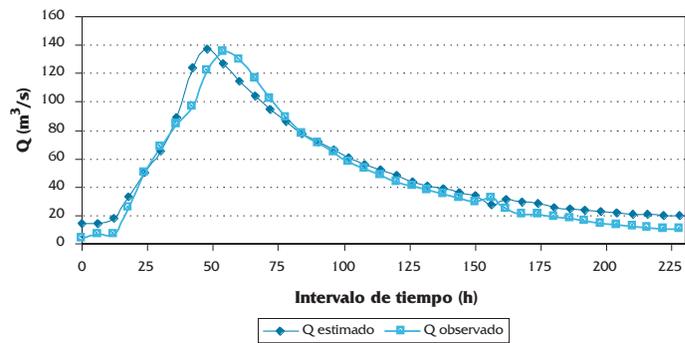


Figura 4 Evento de crecida del 28 de agosto de 1992. Sección de cierre de la cuenca del arroyo Tapalqué

Para la etapa de calibración del modelo HEC-HMS se utilizaron cinco eventos de crecida que tienen asociados caudales observados del orden de 80 m³/s a 297 m³/s. Se aplicó un modelo de regresión lineal entre los caudales observados y estimados, también se estimó el valor del coeficiente de determinación ajustado igual a 0.997. La pendiente de la recta de regresión para un nivel de significación del 10 % indica que no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 : la pendiente de la recta es igual a uno y el intervalo de confianza es de 0.997 a 1.115.

Además, con el objetivo de demostrar el nivel de ajuste alcanzado entre los caudales observados y estimados por el modelo HEC-HMS correspondiente a la etapa de verificación se estimó el valor del coeficiente de determinación ajustado igual a 0.894. La pendiente de la recta para un nivel de significación del 10 % indica que no puede ser rechazada la hipótesis nula H_0 : la pendiente de la recta es igual a uno y el intervalo de confianza es de 0.878 a 1.563.

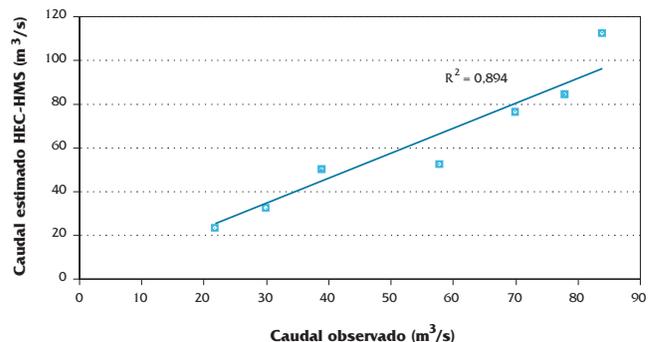


Figura 5 Modelo de regresión lineal. Etapa de verificación del modelo HEC-HMS en la sección de cierre de la cuenca del arroyo Tapalqué

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

A partir de los resultados obtenidos se considera aceptable el nivel de ajuste alcanzado con el modelo HEC-HMS en la sección de cierre de la cuenca del arroyo Tapalqué denominada Avda. de los Trabajadores, figura N° 5.

El modelo HEC-HMS permite estimar el escurrimiento superficial y los caudales para cada subcuenca y el hidrograma total a la salida de la cuenca. En la figura N° 6 se muestra, para siete eventos de crecidas, el nivel de ajuste alcanzado entre el escurrimiento superficial diario estimado por el modelo HEC-HMS y por el modelo SWRRB-WQ a la salida de la subcuenca 5.

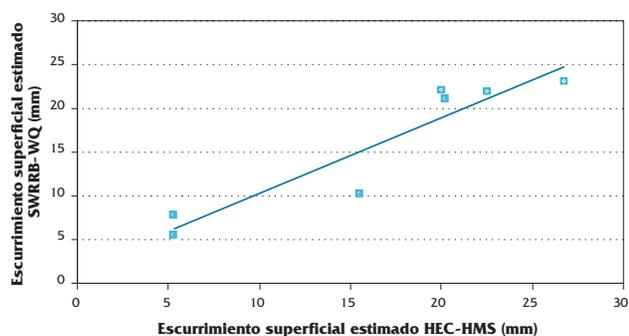


Figura 6 Modelo de regresión lineal. Sección de control, subcuenca 5.

El coeficiente de determinación ajustado, estimado entre los valores del escurrimiento superficial obtenidos a partir de la aplicación de los modelos HEC-HMS y SWRRB-WQ, es igual a 0.855. Además el intervalo de confianza para el parámetro de regresión asociado a la pendiente de la recta, con un nivel de significación del 10 %, indica que no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 : la pendiente de la recta de regresión lineal es igual a uno y el intervalo de confianza es de 0.931 a 1.156.

Los caudales estimados con el modelo HEC-HMS se ajustan convenientemente a los caudales observados a la salida de la cuenca, sección de cierre denominada Avda. de los Trabajadores, para distintos eventos de crecida. Además el escurrimiento superficial estimado con el modelo SWRRB-WQ, para una escala de tiempo diaria, se ajusta apropiadamente al obtenido con el modelo HEC-HMS en la sección de control correspondiente a la subcuenca 5, entonces es posible afirmar que el modelo SWRRB-WQ estima adecuadamente el escurrimiento superficial.

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DIARIA DE LA CARGA DE NITRATOS

Con el propósito de estimar la variación diaria de la carga de nitratos y del escurrimiento superficial se realizó un muestreo intensivo durante el mes de octubre del año 2002 para dos eventos de crecidas observados en escala diaria. A continuación se presentan el hietograma de precipitación diaria observado en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería (figura N° 7) y los resultados obtenidos para los dos eventos mencionados en las figuras N° 8 y 9.

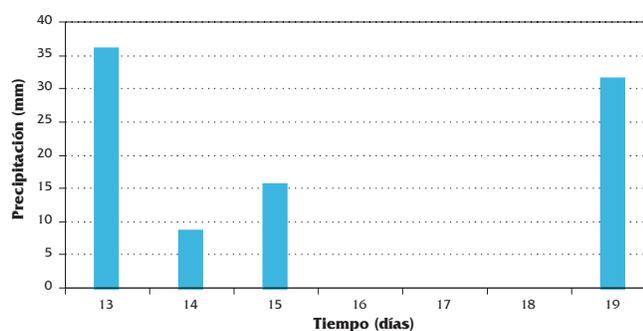


Figura 7 Hietograma de precipitación diaria, del evento de octubre de 2002

Las figuras N° 8 y 9 muestran que la carga de nitratos está asociada al escurrimiento superficial. Aquí, se observa que la carga de nitratos aumenta con el escurrimiento superficial, este resultado es semejante al obtenido por Steinheimer *et al.* (1998) y Varanou *et al.* (2002).

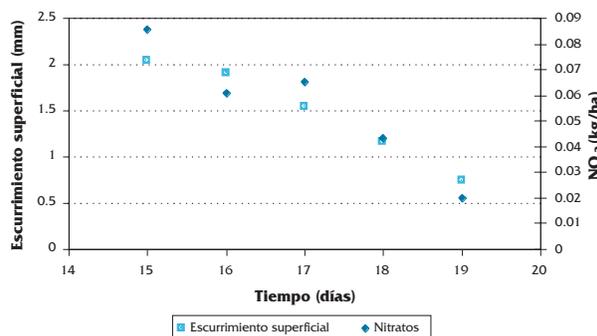


Figura 8 Escurrimiento superficial – carga de nitratos correspondiente al evento del 15 al 19 de octubre de 2002 en la sección de control, subcuenca 5

La carga total de nitratos contenidos en el escurrimiento superficial para el primero y segundo evento registrado durante octubre de 2002 es de 0.2751 kg/ha y 0.2622 kg/ha respectivamente.

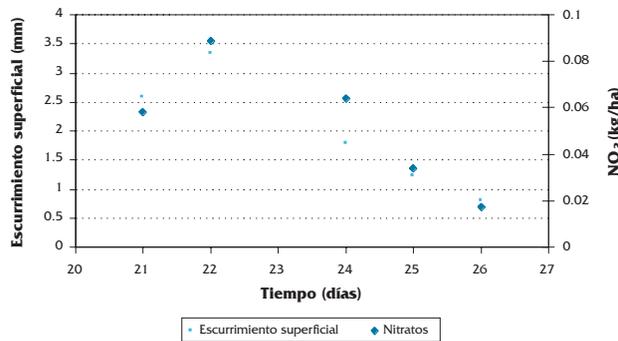


Figura 9 Escurrecimiento superficial – carga de nitratos correspondiente al evento del 21 al 26 de octubre de 2002 en la sección de control, subcuenca 5

Se aplicó un modelo de regresión lineal entre los resultados de los análisis de las muestras de agua de la sección de control del arroyo Tapalqué correspondiente a la subcuenca 5 (Sección A) que ha sido objeto central de este estudio y los obtenidos en otra sección de cierre del arroyo a la cual confluyen las subcuencas 1 a 4 y 6 (Sección B), figura N° 10.

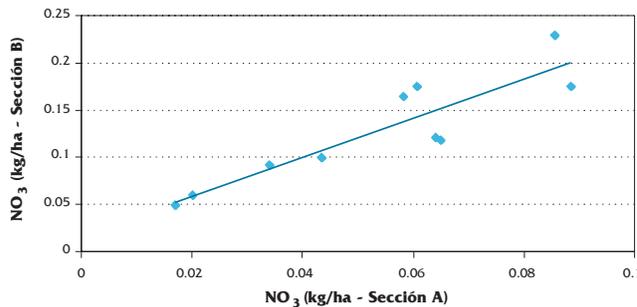


Figura 10 Modelo de regresión lineal entre las cargas de nitratos observadas en dos secciones del arroyo Tapalqué a nivel diario

La aplicación del modelo de regresión lineal entre la carga de nitratos correspondiente a ambas secciones del arroyo Tapalqué indica que el coeficiente de determinación ajustado R^2 es de 0.81. Este valor indica una asociación lineal significativamente distinta de cero para un nivel de confianza del 95 % entre los valores observados de la carga de nitratos en la sección A y la sección B del arroyo Tapalqué. El análisis de la pendiente de la recta muestra que el aporte de nitratos por el escurrecimiento superficial es mayor en la sección B que en la sección A.

diseño experimental y método Montecarlo

El plan de experimentación numérica consistió en utilizar el modelo hidrológico y de calidad de agua y generar distintas trazas sintéticas de variables hidrometeorológicas con el modelo WGEN desarrollado por Richardson (1988).

Las simulaciones se realizaron aplicando distintas cantidades de fertilizante en forma uniforme en la subcuenca a partir de valores medios estándares propuestos para su utilización en agricultura y con información suministrada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

El esquema de simulación consiste en generar cien trazas de variables hidrometeorológicas con el modelo WGEN, que son utilizadas como variables de entrada al modelo de calidad de agua adoptando distintas cantidades de fertilizantes, figura N° 11.

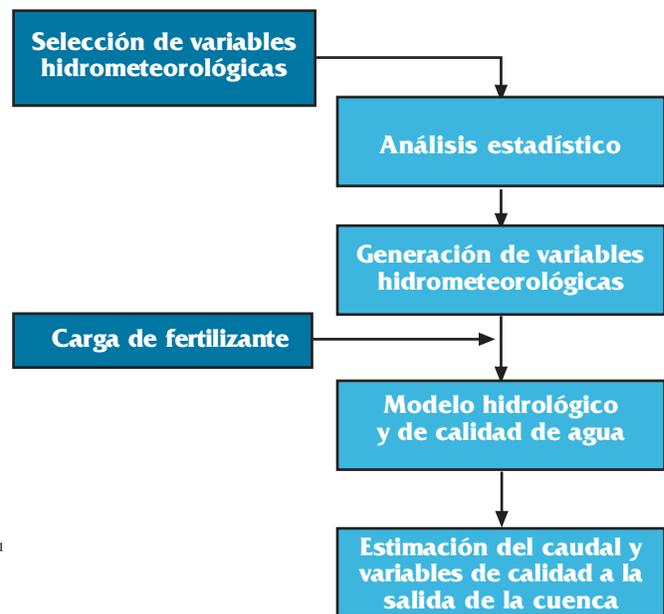


Figura 11 Esquema de simulación utilizado aplicando los distintos modelos matemáticos

Aplicación de un modelo de generación de precipitación diaria

Para la generación de la altura de la precipitación diaria se seleccionó un modelo estocástico que incluye las funciones de densidad de probabilidades Gamma, Log-Normal II, Log-Normal III y Exponencial. Las series históricas de la altura de precipitación corresponden a la Estación del Aeropuerto de Olavarría.

A partir de las series históricas de la altura de precipitación diaria para los distintos meses se estimaron los parámetros de las funciones de densidad de probabilidades propuestas y las distancias entre la función de distribución de probabilidades empírica con las teóricas, utilizando los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov y Cramér-von Mises.

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

$$D_n = \max_{j=1}^n \left[\left| \frac{j}{n} - F_x(X_j) \right| \right] \quad (4)$$

$$W_n = \sum_{j=1}^n \left(F_x(X_j) - \frac{j - \frac{1}{2}}{n} \right)^2 + \frac{1}{12n} \quad (5)$$

donde:

- D_n : distancia de Kolmogorov-Smirnov
- W_n : distancia de Cramér-von Mises
- X_j : altura de precipitación observada
- $F_x(X_j)$: función de distribución acumulada de la altura de precipitación
- j : número de orden
- n : tamaño de la muestra.

Tabla 3 Distancias estimadas de Kolmogorov-Smirnov

Mes	Gamma	Log-Normal II	Log-Normal III	Exponencial
Enero	0.149	0.087	0.191	0.261
Febrero	0.076	0.098	0.143	0.168
Marzo	0.096	0.090	0.167	0.190
Abril	0.068	0.112	0.153	0.178
Mayo	0.118	0.101	0.203	0.223
Junio	0.123	0.083	0.205	0.221
Julio	0.109	0.077	0.161	0.147
Agosto	0.098	0.081	0.188	0.219
Septiembre	0.105	0.090	0.158	0.221
Octubre	0.109	0.099	0.183	0.186
Noviembre	0.063	0.094	0.149	0.129
Diciembre	0.061	0.093	0.138	0.131

En la tabla N° 3 se observa que la distancia de Kolmogorov-Smirnov para los meses de octubre a abril (que es el período de mayor precipitación mensual en la región) es menor para la función de distribución de probabilidades Gamma, excepto para el mes de enero. En los meses de mayo a septiembre la función de distribución Log-Normal II presenta una menor distancia.

La distancia según Cramér-von Mises, tabla N° 4, es menor para la función de distribución de probabilidades Gamma para los meses de mayor precipitación, excepto para los meses de enero, marzo y octubre. Respecto a los meses de menor precipitación mensual (mayo a septiembre) la menor distancia la presenta la función de distribución Log-Normal II.

Tabla 4 Distancias estimadas de Cramér-von Mises

Mes	Gamma	Log-Normal II	Log-Normal III	Exponencial
Enero	0.555	0.176	0.900	2.110
Febrero	0.117	0.123	0.457	0.863
Marzo	0.218	0.096	0.792	1.039
Abril	0.133	0.177	0.579	0.984
Mayo	0.295	0.121	0.825	1.406
Junio	0.229	0.078	0.689	1.117
Julio	0.148	0.074	0.499	0.338
Agosto	0.194	0.079	0.688	1.097
Septiembre	0.168	0.157	0.449	0.985
Octubre	0.189	0.141	0.782	0.851
Noviembre	0.109	0.171	0.663	0.571
Diciembre	0.091	0.191	0.475	0.626

Posteriormente, se generaron cien series de variables hidrometeorológicas de doce años cada una, obteniéndose para cada una de las series generadas la altura de precipitación mensual y posteriormente se promediaron estos valores dando como resultado la precipitación media mensual. En la figura N° 12 se observa la variación estacional de la altura de precipitación media mensual generada con cada una de las funciones de densidad de probabilidades y la altura de la precipitación observada.

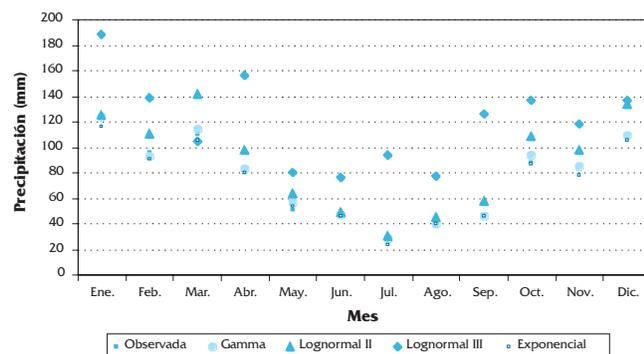


Figura N° 12 Precipitación media mensual. Estación Aeropuerto de Olavarría

A partir de los resultados obtenidos se seleccionó la función de densidad de probabilidades Gamma porque es la que mejor se ajusta a la serie de precipitación histórica observada en escala diaria correspondiente a la Estación del Aeropuerto de Olavarría para el período 1988-1999 y también simula adecuadamente la precipitación media mensual.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Para analizar la bondad del ajuste alcanzado con el modelo hidrológico y de calidad de agua SWRRB-WQ se contrastan los estadísticos media y desvío estándar del escurrimiento superficial y de la carga de nitratos estimados con el modelo con los observados en la sección de control correspondiente a la subcuenca 5 en escala de tiempo anual.

Dada la importancia de definir el período de observación de la carga de nitratos, para una escala de tiempo diaria, se estima la función de correlación cruzada entre la altura de la precipitación y la carga de nitratos. Se contrasta este resultado con el período de tiempo observado, entre la ocurrencia de la precipitación y la carga de nitratos, para los dos eventos de crecidas de octubre de 2002.

Escala de tiempo anual

Para la calibración del modelo se adoptó como escenario que toda la superficie de la subcuenca 5 se encuentra cultivada con trigo y se consideró que el mismo es sembrado a fines de julio y es cosechado a mediados de enero del año siguiente. Los fertilizantes nitrogenados aplicados son: fosfato diamónico, a fines de julio en el momento de la siembra y urea a mediados de octubre.

Teniendo en cuenta las formulas químicas de fosfato diamónico y urea se obtiene que la masa de nitrógeno y fósforo en 100 kg/ha de fosfato diamónico es de 21.21 kg/ha de nitrógeno y 23.45 kg/ha de fósforo, y en 100 kg/ha de urea es de 46.64 kg/ha de nitrógeno.

Los resultados obtenidos de la calibración del modelo en una escala de tiempo anual se muestran en la tabla N° 5.

Tabla 5 Resultados de la calibración del modelo SWRRB-WQ en la sección de control, subcuenca 5

Estadísticos estimados	Estimado	Observado
Media del escurrimiento superficial (mm)	65.57	65.44
Desvío estándar del escurrimiento superficial (mm)	50.23	50.51

Con el modelo SWRRB-WQ se obtuvo un valor medio de la carga de nitratos de 2.54 kg/ha y un desvío de 1.63 kg/ha en la sección de control del arroyo Tapalqué correspondiente a la subcuenca 5.

A partir de los resultados obtenidos con cada una de las simulaciones se estima la carga de nitratos transportada por el escurrimiento en una escala de tiempo anual. De esta nueva serie formada por cien valores anuales se estimó la carga de nitratos para la mediana y las probabilidades de excedencia del 5 % y del 95 %, tabla N° 6.

Tabla 6 Estadísticos anuales de la carga de nitratos en el escurrimiento superficial en la sección de control, subcuenca 5.

Estadísticos	Carga (kg/ha)
Probabilidad de excedencia del 5 %	5.21
Mediana	2.46
Probabilidad de excedencia del 95 %	1.48

Los valores presentados en la tabla N° 6 muestran que la media de la carga de nitratos observada (2.94 kg/ha) está comprendida entre la probabilidad de excedencia del 5 % y de la mediana.

Se compara la variación del escurrimiento superficial y la carga de nitratos en el mismo para cada una de las series, figura N° 13.

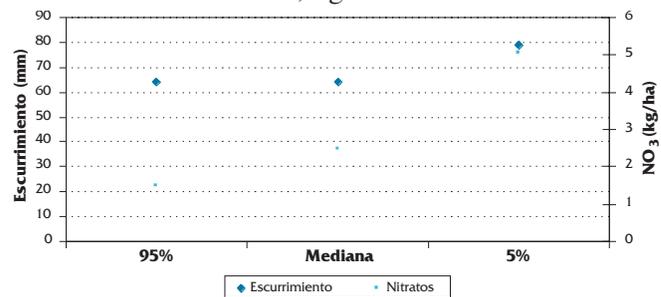


Figura 13 Relación entre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos en la sección de control, subcuenca 5. Escala de tiempo anual

La figura N° 13 muestra que existe una proporcionalidad directa entre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos en el mismo.

Si se compara la precipitación media anual en relación con la carga de nitratos transportados por el escurrimiento, se observa que a medida que

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

aumenta la precipitación media anual mayor es la carga masa de nitratos transportados por el escurrimiento superficial, figura N° 14.

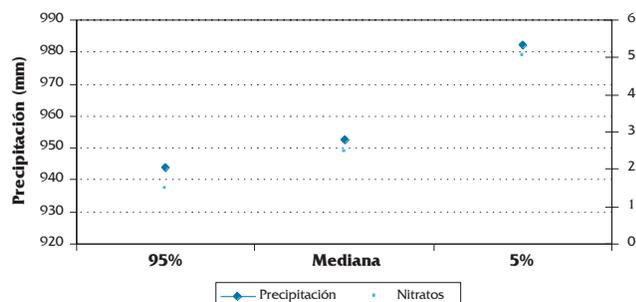


Figura 14 Relación entre la precipitación y la carga de nitratos en la sección de control, subcuenca 5. Escala de tiempo anual

Escala de tiempo diaria

Con el objetivo de estimar el tiempo de observación de la variable carga de nitratos en un evento de precipitación se estudia la asociación lineal entre la altura de la precipitación y la carga de nitratos en el escurrimiento utilizando la función de correlación cruzada entre ambas variables a partir de la expresión propuesta por Box y Jenkins (1976).

$$r_{x,y}(k) = \frac{1}{n} \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y})}{S_x S_y} \quad (6)$$

donde: $k = 1, 2, \dots, n$

x: serie temporal 1

y: serie temporal 2

\bar{x} : media de la serie temporal 1

\bar{y} : media de la serie temporal 2

S_x : desvío estándar de la serie temporal 1

S_y : desvío estándar de la serie temporal 2

t: tiempo

n: cantidad de datos de las series

k: retardo.

En las figuras N° 15 a 17 se presentan las funciones de correlación cruzada para las series de la probabilidad de excedencia del 5 %, la mediana y la probabilidad de excedencia del 95 % de la carga de nitratos estimadas en la sección de control (subcuenca 5), respectivamente.

En la figura N° 15 se muestra que los coeficientes de la función de correlación cruzada son distintos de cero para los retardos de 0 y 1 días.

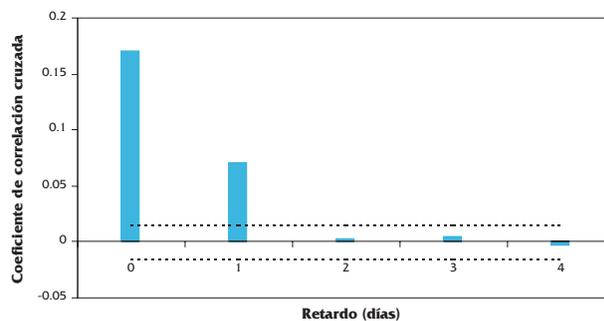


Figura 15 Función de correlación cruzada. Serie del 5% de la carga de nitratos, en la sección de control, subcuenca 5.

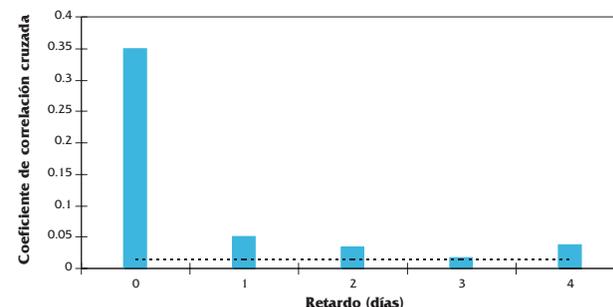


Figura 16 Función de correlación cruzada. Serie de la mediana de la carga de nitratos, en la sección de control, subcuenca 5.

Los coeficientes de la función de correlación cruzada son distintos de cero para los retardos de 0 a 4 días, figura N° 16.

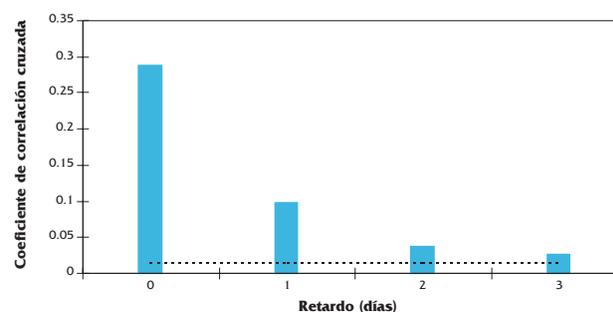


Figura 17 Función de correlación cruzada. Serie del 95 % de la carga de nitratos, en la sección de control, subcuenca 5.

La figura N° 17 muestra que los coeficientes de correlación cruzada son distintos de cero para los retardos de 0 hasta 3 días inclusive.

Los resultados obtenidos del análisis de la función de correlación cruzada para las distintas series simuladas, indican que existe una relación entre la variable aleatoria altura de la precipitación y la carga de nitratos en el escurrimiento hasta aproximadamente cuatro días después de ocurridos los eventos de precipitación.

Así, los resultados de la aplicación del modelo SWRRB-WQ y de la técnica de simulación Montecarlo permitió definir un período aproximado de observación de la carga de nitratos para el cuál sería conveniente intensificar las observaciones de las muestras de agua en la sección del arroyo Tapalqué.

Estos resultados son consistentes con las observaciones obtenidas a partir de los dos eventos de precipitación y de calidad de agua analizados durante el año 2002 y permiten afirmar la necesidad de intensificar la toma de muestras de agua en el curso del arroyo Tapalqué durante los cinco días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación.

CONCLUSIONES

La realización de esta investigación ha definido las principales condiciones iniciales para un plan de muestreo en una cuenca rural que presenta información escasa y además se ha mostrado la posibilidad de aplicar un modelo hidrológico y de calidad del agua para mejorar el conocimiento de los efectos combinados de la variabilidad temporal de la precipitación sobre la carga de nitratos en el escurrimiento superficial.

Los resultados de las simulaciones indican que existe una asociación entre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos contenidos en el mismo para una escala de tiempo anual. Además, el valor medio anual estimado de la carga de nitratos, 2.54 kg/ha, en el escurrimiento superficial es del mismo orden de magnitud que el valor medio observado para los años 1994 y 2002.

Se observa para los eventos de octubre de 2002 que la evolución temporal de la carga de nitratos está asociada linealmente al escurrimiento superficial para una escala de tiempo diaria y el resultado es semejante al obtenido por Steinheimer *et al.* (1998) y Montgomery y Kennedy (1985).

La función de correlación cruzada estimada entre la precipitación y la carga de nitratos contenidos en el escurrimiento superficial presenta resultados consistentes con los obtenidos de los muestreos realizados durante octubre de 2002. Los resultados de este análisis muestran la importancia que los muestreos de la carga de nitratos se intensifiquen durante aproximadamente los cinco días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación.

Además, se seleccionó y aplicó el modelo Gamma de dos parámetros estimados con el método de máxima verosimilitud para desarrollar las simulaciones necesarias en el plan de experimentos propuesto. Las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov y de Cramér-von Mises indicaron que el modelo Gamma de dos parámetros es el más adecuado para simular, en escala diaria, la variable altura de la precipitación.

A partir de los resultados obtenidos con el modelo hidrológico y de calidad de agua SWRRB-WQ y las concentraciones de nitratos observadas en la sección del arroyo Tapalqué se propone: a) ubicar las estaciones de monitoreo en aquellas secciones del curso de agua que tengan asociadas, conforme a la red de drenaje natural, áreas de aporte sembradas con un mismo tipo de cultivo, b) realizar análisis químicos de los suelos para determinar la carga de fertilizantes (nitrógeno y fósforo) inicial al momento de la siembra, c) realizar los muestreos una vez por mes, d) intensificar los muestreos durante un período de cinco días después de ocurrido un evento de precipitación superior a 50 mm y e) en los meses de aplicación de los fertilizantes sería conveniente tomar las muestras de agua en forma semanal y realizar análisis químicos de los suelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento al Lic. Oscar Díaz y a la Profesora Viviana Colasurdo quienes realizan el análisis de muestras de agua del arroyo Tapalqué. Al Ing. Hugo Santonja del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria con sede en Olavarría por la información recibida y sus valiosos comentarios. Al Licenciado Marcelo Gandini por la interpretación de las imágenes satelitales. Al Ing. Oscar Natale por las revisiones y apreciados comentarios durante el desarrollo del presente trabajo.

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

REFERENCIAS

- Box G. and G. Jenkins. 1976. *Times series analysis forecasting and control*. Holden Day.
- Chaubey I., C. T. Haan, S. Grunwald and J. M. Salisbury. 1999. "Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall". *Journal of Hydrology*. 220: 48-61.

APLICACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUA Y DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA EL MONITOREO DE UN FERTILIZANTE EN UNA CUENCA RURAL

- Clark, C.O. 1943. Storage and the unit hydrograph. Proceedings of American Society of Civil Engineers. 69: 1419-1447
- Hyer K. E., G. M. Hornberger and J. S. Herman. 2001. "Processes controlling the episodic streamwater transport of atrazine and other agrichemicals in an agricultural watershed". Journal of Hydrology. 254: 47-66.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2000. "Guías prácticas para los cultivos de trigo, maíz, soja y girasol".
- McElroy A. D., S. Y. Chiu and J. W. Nebgen. 1976. "Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources". Environ. Prot. Tech. Serv., EPA 600/2 - 76-151.
- Maidment D. 1993. Handbook of hydrology. McGraw Hill.
- Melgar R. y M. Díaz Zorita. 1997. La fertilización de cultivos y pasturas. Hemisferio Sur.
- Monteith, J. L. 1977. "Climate and the efficiency of crop production in Britain". Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B. 28:277-329.
- Montgomery R. and R. Kennedy. 1985. "Relationships in water quality and hydrologic variables during storm events". Multivariate Analysis of Hydrologic Processes. Proceeding of Fourth International Hydrology Symposium. 605-619.
- Novotny V., L. Freizhou and W.G. Wawrzyn. 1994. "Monte-carlo modeling of water and sediment contamination by toxic metals at the North Avenue Dam". Water Science Technology. 30(2): 109-119.
- Richardson C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Research (17) 1: 182-190.
- Richardson C.W. 1988. "WGEN: A model for generating of daily weather variables". United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service. ARS-8.
- Steinheimer T. R. and K. D. Scoggin. 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.
- USDA-SCS. 1972. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Capítulos: 4-10.
- Varanou E., E. Gkouvatsou, E. Baltas and M. Mimikou. 2002. "Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of Soil and Water Assessment Tool model". Journal of Hydrologic Engineering. (7) 3: 228-244.
- Viney N.R., M. Sivapalan and D. Deeley. 2000. "A conceptual model of nutrient mobilization and transport applicable at large catchment scales". Journal of Hydrology. 240: 23-44.
- Wanieltista M. and Y. Yousef. 1992. Stormwater management. John Wiley and Sons, Inc.
- Williams J. R., A. D. Nicks and J. G. Arnold. 1985. "Simulator for water resources in rural basin". ASCE, Journal of Hydraulic Engineering. 111(6): 970-986.
- Williams J. R., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1984. "A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity". Trans. ASAE 27: 129-144.
- Williams J. R. and H. D. Berndt. 1977. "Sediment yield prediction based on watershed hydrology". Trans. ASAE 20(6): 1100-1104.
- Williams J. R. and R. W. Hann. 1978. "Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints". Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. N° 96.

