

ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE NITRATOS EN UNA CUENCA RURAL Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

• Mónica Gelmi •

Universidad Nacional de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

• Rafael Santiago Seoane •

Instituto Nacional del Agua, Argentina

Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar, por una parte, la capacidad del modelo *Simulator Water Resources in Rural Basins-Water Quality (SWRRB-WQ)*, para estimar la carga de un fertilizante nitrogenado transportado por el escurrimiento superficial en una subcuenca del arroyo Tapalqué (Provincia de Buenos Aires, Argentina) y, por otro lado, analizar el efecto que produce la variabilidad climática originada por las fases de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el escurrimiento y la carga de un fertilizante. El modelo *SWRRB-WQ* consiste básicamente en una representación hidrológica y de calidad de agua asociado con un modelo de generación de variables hidrometeorológicas. Con el propósito de analizar la variabilidad del escurrimiento superficial y la carga de nitratos en la sección de control ubicada a la salida de la subcuenca, se utiliza la precipitación observada en la estación meteorológica de Azul para el periodo de 1961 a 1990 como variable de entrada al modelo *SWRRB-WQ*. Los resultados de este análisis muestran el efecto de la variabilidad observada en la precipitación asociada con las fases del ENOS sobre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos transportada en diferentes escalas temporales.

Palabras clave: variabilidad climática, modelos hidrológicos-calidad de agua, nitratos.

Introducción

Esta investigación tiene por objetivo estudiar la capacidad del modelo hidrológico y de calidad de agua denominado *Simulator Water Resources in Rural Basins-Water Quality (SWRRB-WQ)* para estimar la carga de un fertilizante nitrogenado en una subcuenca rural del arroyo Tapalqué y analizar la relación entre la variabilidad de la precipitación asociada con las fases del El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y los valores estimados del escurrimiento superficial y la carga de nitratos.

La variabilidad espacial y temporal de la precipitación asociada con las fases extremas del ENOS (Haylock *et al.*, 2006), además de afectar el

volumen de escurrimiento superficial (Bidegain *et al.*, 2005), también tiene incidencia en el transporte de fertilizantes en cuencas rurales (Magrin *et al.*, 2005).

Según Haylock *et al.* (2006), los eventos más importantes de El Niño ocurridos en el siglo XX fueron en los años 1982 y 1983, 1997 y 1998, los cuales produjeron grandes avenidas en algunos ríos pertenecientes a la cuenca del Plata, entre los que se puede citar el Paraná, el Uruguay y el Paraguay (Bidegain *et al.*, 2005).

En Berbery *et al.* (2006) se observa una tendencia positiva en la serie de precipitación anual correspondiente al periodo de 1961 a 2000, asociada con la fase de El Niño en Paraguay y con la fase "Neutra" en las provincias de Buenos

Aires y La Pampa. En cambio, en las provincias del litoral argentino, la tendencia también es positiva, pero para ambas fases.

Como puede corroborarse en Magrin *et al.* (2000, 2005) y Sierra (2007), muestran que en la fase de La Niña, en las provincias de Buenos Aires, La Pampa, centro-sur de Córdoba, sur de Santa Fe y Entre Ríos, la precipitación tiende a disminuir en primavera y verano, con menores temperaturas mínimas en invierno y mayores temperaturas máximas en verano. Lo anterior es contrastante con lo ocurrido en la fase de El Niño, el cual causa incrementos en la precipitación en primavera y verano, temperaturas mínimas superiores a lo esperado en invierno, y máximas inferiores en verano.

En Berri *et al.* (2002), a partir de un estudio realizado con registros de precipitación de 24 estaciones localizadas en la región pampeana, se muestra que la precipitación disminuye para la fase de La Niña en los meses de octubre a marzo y aumenta en la fase de El Niño en los meses de noviembre, diciembre, marzo y abril.

Asimismo, se ha visto que la variación de la precipitación asociada con las fases del ENOS impacta directamente en la producción de cultivos de la región pampeana. Por ejemplo, durante la fase de La Niña, la reducción en la producción fue del 57% respecto a la media: en este caso se sugiere una siembra tardía con menos carga de fertilizante nitrogenado. Otro claro ejemplo se observa en la producción de trigo, ya que durante la fase de El Niño, para mantener el volumen de cosecha, es conveniente la siembra temprana y la aplicación de altas cargas de nitrógeno como fertilizante (Magrin *et al.*, 2005).

La modificación en la aplicación de cargas de fertilizantes en los cultivos es un impacto indirecto de la variabilidad climática asociado con las fases del ENOS y se asocia tanto al cambio en la temperatura como en la precipitación. En el caso de la precipitación, el escurrimiento consecuente trae consigo variaciones en el volumen de fertilizante transportado. La importancia de este análisis radica en determinar el volumen de fertilizante

transportado por el escurrimiento que afecta la calidad del agua para consumo ganadero, pero sobre todo humano, dada las implicaciones de salud.

La presencia de elevadas concentraciones de nitratos en agua para consumo humano puede generar en los lactantes, hasta los seis meses de vida, metahemoglobinemia. En los adultos puede causar problemas gástricos de importancia, porque el nitrato se transforma en nitrito, y puede reaccionar con aminas y amidas en el estómago, que dan lugar a otros compuestos, denominados nitrosoaminas y nitrosoamidas.

En el caso del agua de consumo ganadero, también suele ocasionar padecimientos gastro-intestinales, ya que el consumo de agua contaminada con nitratos y la reacción producida por la actividad bacteriana del tracto digestivo transforma el nitrato en nitrito, el cual se absorbe más rápidamente y es altamente tóxico, diez veces más que el nitrato (Bagley *et al.*, 1997).

Dada la importancia vista en el ámbito de salud humana y animal, resulta conveniente determinar la variación en la carga de fertilizantes, en específico de nitratos, y el volumen transportado en el escurrimiento superficial, cuyo destino pueden ser las fuentes de suministro. Por ello se elaboró la metodología que se detalla a continuación.

Metodología

La metodología desarrollada consiste en aplicar un modelo hidrológico y de calidad de agua denominado *SWRRB-WQ*, para estimar la carga de nitratos en el escurrimiento superficial para el periodo de 1961 a 1990, y estudiar con un enfoque estadístico la influencia de la variabilidad de la precipitación asociada con las fases del ENOS sobre la carga de nitratos transportada con el escurrimiento superficial en una subcuenca del arroyo Tapalqué (provincia de Buenos Aires).

En esta etapa se presentan los valores del escurrimiento superficial y de la carga de ni-

tratos obtenidos en la calibración del modelo hidrológico, y de calidad de agua SWRRB-WQ, que utiliza como variables de entrada la precipitación, y la temperatura máxima y mínima, correspondiente a la estación meteorológica del Aeropuerto de Olavarría, para el periodo 1988-2002.

La aplicación del modelo hidrológico y de calidad de agua que utiliza como variable de entrada la precipitación observada correspondiente a un periodo de treinta años permite estudiar la influencia de esta variable de entrada asociada con las fases del ENOS sobre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos.

Se aplica la técnica de Bootstrap (Efron y Tibshirani, 1993), con el propósito de estimar la diferencia en los valores medios correspondientes a la serie total y cada una de las series parciales asociadas con las fases del ENOS de las variables precipitación observada, escurrimiento superficial y carga de nitratos, obtenidas a partir de la aplicación del modelo hidrológico y de calidad de agua.

Los resultados obtenidos permiten mostrar la incidencia de las fases del ENOS en la precipitación observada en distintas escalas temporales y también la influencia de la precipitación sobre los valores del escurrimiento superficial y de la carga de nitratos para el periodo de aplicación de fertilizantes en una subcuenca rural del arroyo Tapalqué.

Información básica

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 Brandsen-Las Flores. Tiene una superficie de 1 560 km², con pendientes medias comprendidas entre 1.2 a 5.0‰, precipitación media anual de 941.5 mm y temperatura media de 15.2 °C, correspondientes

al periodo 1988-2002 (estación meteorológica del aeropuerto de Olavarría).

La subcuenca cinco tiene una superficie de 320.6 km², con una pendiente promedio de 1.3‰, y un tiempo de concentración de aproximadamente 37 horas. Del análisis de cuatro imágenes de satélite se determina que la superficie sembrada representa aproximadamente un 63% del área total de la subcuenca en estudio y un 13% de la superficie total de la cuenca (Gelmi, 2005).

En la figura 1 se presenta la ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Tapalqué y de la subcuenca 5.

En Gelmi y Seoane (2004) se describe la metodología aplicada para estimar el escurrimiento superficial y determinar los valores observados de la carga de nitratos en la sección de control correspondiente a la subcuenca cinco, motivo de este estudio.

Variabilidad de la precipitación en la estación meteorológica Azul

Para analizar la diferencia entre la precipitación asociada a las fases de El Niño y La Niña respecto a la serie completa de precipitación, se aplica la técnica estadística de Bootstrap (Efron y Tibshirani, 1993) a nivel estacional y mensual, para el periodo de 1961 a 1990. El criterio utilizado para identificar las fases de El Niño y La Niña es el propuesto por Trenberth (1997).

El análisis utiliza el estadístico dm , que es definido como la diferencia de las medias \bar{X} e \bar{Y} de las dos series. Los errores estándar ES_x y ES_y se estimaron usando el método de Bootstrap (Efron y Tibshirani, 1993). La expresión del estadístico es:

$$dm = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{ES_x^2 + ES_y^2}}$$

Los valores del estadístico dm mayores o cercanos a 2 indican que existe una posible diferencia entre las verdaderas medias.

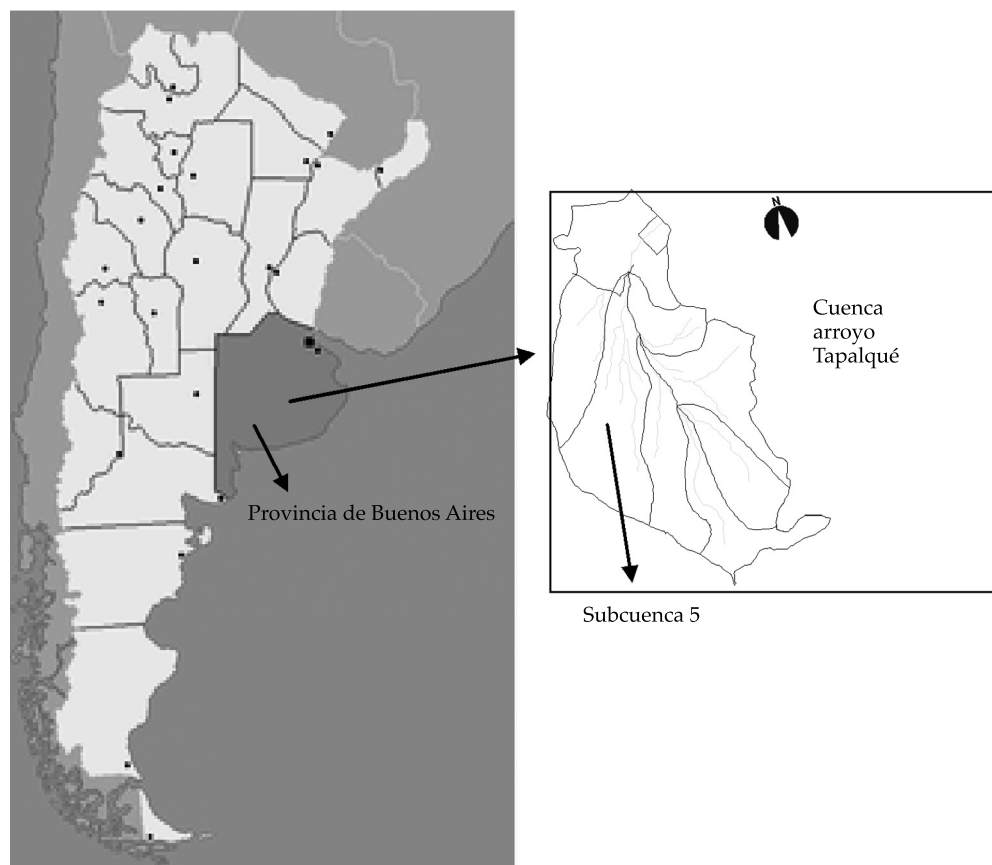


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio en la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Los valores obtenidos del estadístico dm para las distintas estaciones del año se presentan en el cuadro 1.

Este primer análisis muestra que para la fase de El Niño, la diferencia en medias de la suma de la precipitación es superior a 30.00 mm para las estaciones de primavera y otoño, con una máxima de 40.75 en otoño (cuadro 1).

Este resultado es consistente con lo obtenido por Spescha *et al.* (2004) en la región pampeana, donde en otoño obtienen mayores excesos asociados con la fase de El Niño y también una tendencia creciente en la precipitación.

Con respecto al estadístico dm , se observa que el mismo es inferior a 2, con un valor de 1.23 para primavera. Esto se debe a que tanto

Cuadro 1. Diferencia entre las medias de la suma de la precipitación estacional.

Estación	Dif. El Niño-ST (mm)	Dif. error estándar	dm	Dif. La Niña-ST (mm)	Dif. error estándar	dm
Verano	5.34	30.69	0.17	-31.08	28.92	-1.07
Otoño	40.75	78.99	0.52	-2.62	36.98	-0.07
Invierno	24.81	26.42	0.94	-13.83	27.68	-0.50
Primavera	32.99	26.72	1.23	-52.81	25.61	-2.06

en primavera como en otoño, la diferencia del error estándar es importante y muestra una mayor dispersión entre los valores de la suma de la precipitación observada en ambas estaciones y series analizadas.

Para la fase de La Niña, el cuadro 1 muestra que la diferencia en medias de la suma de la precipitación es negativa, con un valor de más de 30 mm para las estaciones de primavera y verano, con una máxima de 52.81 y un valor del estadístico dm superior a 2 en primavera.

Se realizó un análisis similar en escala de tiempo mensual. En el cuadro 2 se presentan los valores obtenidos de las diferencias en medias, el error estándar y el estadístico dm .

El cuadro 2 muestra que las diferencias en media de la precipitación observada asociada con la fase de El Niño es positiva y superior a 30 mm para el mes de abril y también tiene asociada una diferencia del error estándar muy elevada, con lo cual el estadístico dm es inferior a 2. Además, para los meses de octubre, noviembre, diciembre, marzo y mayo, se observa que la diferencia en medias es superior a 15 mm.

Para la fase de La Niña se observa una diferencia negativa de más de 30 mm para el

mes de octubre y también un valor de dm muy próximo a 2. Además, el mes de noviembre muestra una diferencia en medias del orden de 25 mm y un valor elevado de dm de 1.57.

Los valores presentados en los cuadros 1 y 2 muestran que para la fase de La Niña, la precipitación disminuye en primavera, principalmente para los meses de octubre y noviembre. Para la fase de El Niño, la precipitación aumenta en primavera y en otoño, especialmente para los meses de octubre a diciembre y de marzo a mayo.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos por las investigaciones realizadas en la región pampeana por Magrin *et al.* (2000, 2005), Sierra (2007) y Berri *et al.* (2002), quienes observaron que la precipitación para la fase de La Niña disminuye en primavera y verano, y para la fase de El Niño aumenta en otoño y primavera.

También se aplicó el método de Bootstrap (Efron y Tibshirani, 1993) a las diferencias entre las medias de la suma de la precipitación observada, correspondientes a las fases de El Niño y La Niña para una escala de tiempo estacional y mensual (cuadros 3 y 4).

El cuadro 3 muestra que la diferencia en media de la suma de la precipitación observada

Cuadro 2. Diferencia entre las medias de la suma de la precipitación observada mensual.

Mes	Dif. El Niño-ST (mm)	Dif. error estándar	dm	Dif. La Niña-ST (mm)	Dif. error estándar	dm
Enero	-5.37	17.64	-0.30	-1.18	19.69	-0.06
Febrero	1.76	11.64	0.15	2.56	19.33	0.13
Marzo	16.69	27.63	0.60	0.61	25.87	0.02
Abril	33.85	48.51	0.70	-1.35	26.49	-0.05
Mayo	18.45	18.51	0.99	8.44	16.71	0.50
Junio	12.92	8.93	1.45	10.91	10.56	1.03
Julio	10.00	17.22	0.58	-13.74	13.44	-1.02
Agosto	8.24	10.81	0.76	-5.82	19.67	-0.29
Septiembre	12.21	14.54	0.84	3.36	12.89	0.26
Octubre	21.40	16.28	1.31	-31.62	15.93	-1.98
Noviembre	15.49	14.96	1.04	-24.55	15.59	-1.57
Diciembre	17.47	16.54	1.06	-8.84	15.26	-0.58

Cuadro 3. Diferencia entre las medias de la suma de la precipitación estacional.

Estación	El Niño (mm)	La Niña (mm)	Dif. error estándar	<i>dm</i>
Verano	308.30	271.88	33.38	1.09
Otoño	313.54	270.17	80.75	0.53
Invierno	152.31	113.67	35.24	1.09
Primavera	282.30	196.50	30.08	2.85

Cuadro 4. Diferencia entre las medias de la suma de la precipitación observada mensual.

Mes	El Niño (mm)	La Niña (mm)	Dif. error estándar	<i>dm</i>
Enero	106.18	110.37	21.70	-0.19
Febrero	93.70	94.50	19.86	-0.04
Marzo	143.25	127.17	33.54	0.48
Abril	117.37	82.17	48.33	0.73
Mayo	81.16	71.14	22.14	0.45
Junio	54.26	52.25	12.27	0.16
Julio	53.91	30.17	19.84	1.19
Agosto	50.50	34.28	20.70	0.78
Septiembre	72.60	63.75	16.86	0.52
Octubre	118.77	65.75	18.72	2.83
Noviembre	107.04	67.00	17.12	2.34
Diciembre	116.94	90.62	18.78	1.40

para la estación de primavera asociada con la fase de La Niña respecto a la fase de El Niño es igual a 85 mm y tiene asociado un valor del estadístico *dm* superior a 2. En verano, otoño e invierno, las diferencias son del orden del 36, 43 y 39 mm, respectivamente y están asociadas con diferencias del error estándar muy importantes, con lo cual el estadístico *dm* es inferior a 2.

Los valores de las medias de la suma de la precipitación observada para la fase de La Niña son inferiores a las asociadas con la fase de El Niño, en valores de 53 y 40 mm para los meses de octubre y noviembre. Además, el estadístico *dm* es superior a 2 para ambos meses, e indica que existe una diferencia entre las verdaderas medias de la precipitación

asociadas con las fases de El Niño y La Niña. Para el mes de abril, la diferencia es del orden de 35 mm, con una diferencia elevada en el error estándar.

Aplicación de la prueba estadística de Mann Whitney

La serie de precipitación histórica de la estación meteorológica de Azul se utilizó como variable de entrada al modelo hidrológico y de calidad de agua porque presenta un registro histórico extenso que incluye un número importante de las fases del ENOS. Entonces se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Mann Whitney, con el propósito de comparar si las series de precipitación diaria de las

estaciones meteorológicas de Olavarría y Azul —para un periodo común a ambas estaciones, que es el comprendido entre los años 1988 y 1999— provienen de una misma población para un nivel de significación del 10%.

La hipótesis nula H_0 considera que las series de precipitación diaria provienen de la misma población y por lo tanto sus funciones de densidad de probabilidades son iguales; la hipótesis alternativa H_1 reconoce que las series no provienen de la misma población y entonces sus funciones de densidad de probabilidades no son iguales; ambas hipótesis requieren que las series sean independientes.

Los resultados obtenidos muestran que para todos los meses del año, con excepción de abril, se acepta la hipótesis nula, que dice que las series de precipitación diaria de las estaciones meteorológicas de Olavarría y Azul provienen de una misma población.

Valores observados de la carga de nitrato en la fase El Niño

La agencia denominada National Oceanic and Atmospheric Administration del Departamento de Comercio de Estados Unidos (NOAA) clasifica los años 2002 y 2004 como fases del ENOS de calentamiento; en particular, el año 2004 corresponde a una fase de El Niño de menor magnitud que la del 2002. En el cuadro 5 se muestran los valores observados de la precipitación, el escurrimiento superficial y la carga de nitratos para los meses de julio a octubre.

Los valores presentados en el cuadro 5 indican que a medida que se incrementa la

precipitación también aumenta el escurrimiento superficial y la carga de nitratos transportada por el mismo. En el caso particular del mes de julio para los dos años analizados y el mes de octubre de 2002, donde la precipitación es del mismo orden de magnitud y el escurrimiento superficial asociado a cada mes es de diferente orden de magnitud, se podría deber a la distribución espacial y temporal de los eventos de la precipitación.

Resultados de la aplicación del modelo SWRRB-WQ

El escenario adoptado en la etapa de calibración del modelo SWRRB-WQ, denominado escenario inicial, considera que toda la superficie de la cuenca está cultivada con trigo, que se siembra a fines de julio, y cosechado a mediados de enero del año siguiente. Los fertilizantes aplicados se distribuyen de la siguiente forma: a fines de julio, en el momento de la siembra, se utiliza fosfato diamónico; posteriormente, a mediados de octubre, en la etapa de macollaje del cultivo, se utiliza urea. La carga aplicada de cada uno de los fertilizantes es de 100 kg/ha.

Teniendo en cuenta las fórmulas 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. En total se aplican 67.85 kg/ha de nitrógeno, que equivale a decir que se han aplicado en total 300.37 kg/ha de nitratos.

Para seleccionar el tipo de cultivo, el periodo de siembra/cosecha y el momento

Cuadro 5. Comparación entre variables hidrológicas y de calidad de agua.

Mes	Precipitación (mm)		Escurrimiento superficial (mm)		Carga de nitratos (kg/ha)	
	2002	2004	2002	2004	2002	2004
Julio	77.1	71.8	1.57	0.39	0.016	0.008
Agosto	119.4	56.8	17.58	0.39	0.739	0.019
Septiembre	68.6	20.1	7.77	0.39	0.109	0.027
Octubre	159.7	62.1	22.41	0.39	0.625	0.028

de aplicación del fertilizante nitrogenado, se consultó a la Agencia de Extensión Olavarría, perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que brinda asesoramiento técnico a los productores agropecuarios de la región.

Con el propósito de analizar los efectos de la variabilidad de la precipitación sobre la carga de nitratos, se simularon dos escenarios con diferentes cargas de fertilizantes nitrogenados a partir de la recomendaciones de Magrin *et al.* (2005), quienes sugieren aumentar o disminuir la carga fertilizante nitrogenado cuando suceden las fases de El Niño y La Niña, respectivamente.

El escenario 1 incluye una aplicación de 200 kg/ha de fosfato diamónico a la siembra y otra de 230 kg/ha de urea al macollaje; para el escenario 2 se aplican 50 kg/ha de cada uno de los fertilizantes mencionados. Las fechas de aplicación asociadas con estos dos escenarios son las mismas que para el escenario inicial.

A partir de las fórmulas químicas del fosfato diamónico y de la urea, se obtiene que la masa de nitrógeno y fósforo en 200 kg/ha de fosfato diamónico es igual a 42.43 kg/ha y 46.90 kg/ha, respectivamente, y en 230 kg/ha de urea se tiene una masa de nitrógeno de 107.28 kg/ha. En total se aplican 149.71 kg/ha de nitrógeno, que representan 662.77 kg/ha de nitratos.

De la misma manera, en 50 kg/ha de fosfato diamónico se tiene una masa de 10.61 kg/ha de nitrógeno y 11.73 kg/ha de fósforo, y en 50 kg/ha de urea se tiene una masa 23.32 kg/ha de nitrógeno. En total, para este escenario se aplican 33.93 kg/ha de nitrógeno, que equivalen a 150.21 kg/ha de nitratos.

Etapa de calibración

En este párrafo se muestran los valores medios del escurrimiento superficial y de la carga de nitratos obtenidos a partir de la aplicación del modelo hidrológico y de calidad de agua que utiliza como variables de entrada la precipitación, y las temperaturas máxima y mínima observadas en la estación

del Aeropuerto Olavarría para el periodo 1988-2002.

Con el propósito de analizar el ajuste alcanzado con el modelo *SWRRB-WQ*, se aplica la metodología propuesta por Harmel y Smith (2007), que permite estimar el rango probable de error en los valores medios observados del escurrimiento superficial y de la carga de nitratos, es decir, la incertidumbre en las variables observadas.

Los límites de incertidumbre en las variables observadas, para los meses en los cuales se aplica el fertilizante nitrogenado, se muestran en las figuras 2 y 3. También se tiene que los valores medios estimados del escurrimiento y de la carga de nitratos —en la etapa de calibración del modelo— se encuentran dentro de los límites de incertidumbre calculados para los valores medios observados de ambas variables.

Los valores medios del escurrimiento superficial calculados con el modelo hidrológico y de calidad de agua para los meses de agosto, septiembre y octubre se consideran aceptables, porque se ubican dentro de los límites establecidos para los valores medios observados del escurrimiento superficial.

Para los meses en que se aplica el fertilizante, la carga media de nitratos obtenida con el modelo *SWRRB-WQ* se encuentra dentro de los límites estimados para los valores medios observados de la carga de nitratos.

Análisis asociado con la variabilidad climática

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo hidrológico y de calidad de agua son el escurrimiento superficial y la carga de nitratos para el periodo 1961-1990. A continuación se estima el estadístico *dm* para una escala de tiempo mensual, con el propósito de analizar la existencia de diferencias en medias del escurrimiento superficial y la carga de nitratos asociadas con las fases de El Niño y La Niña respecto a la serie total de cada una de las variables mencionadas.

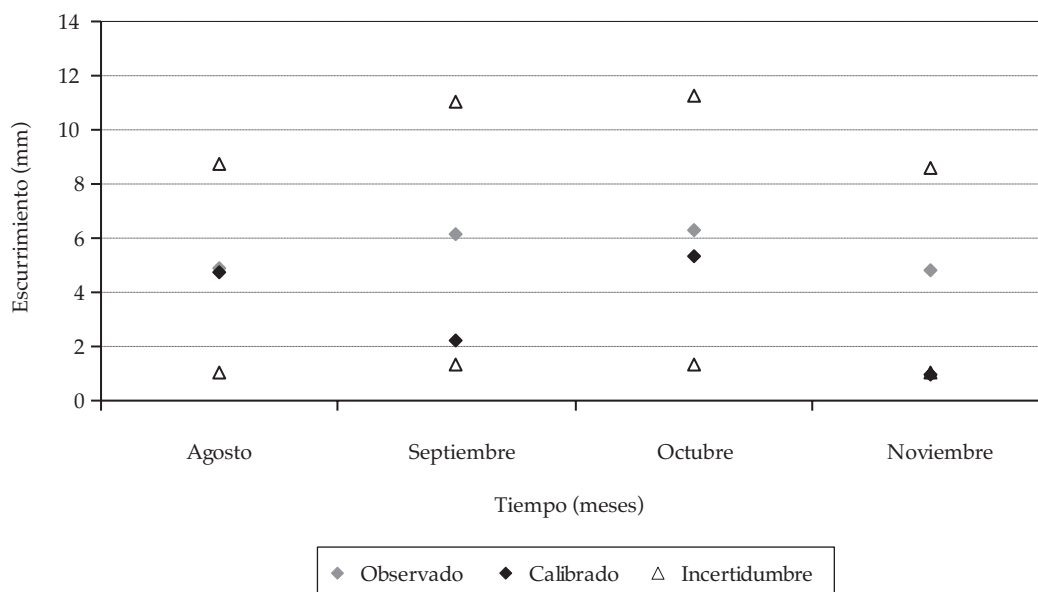


Figura 2. Esguerrimiento superficial.

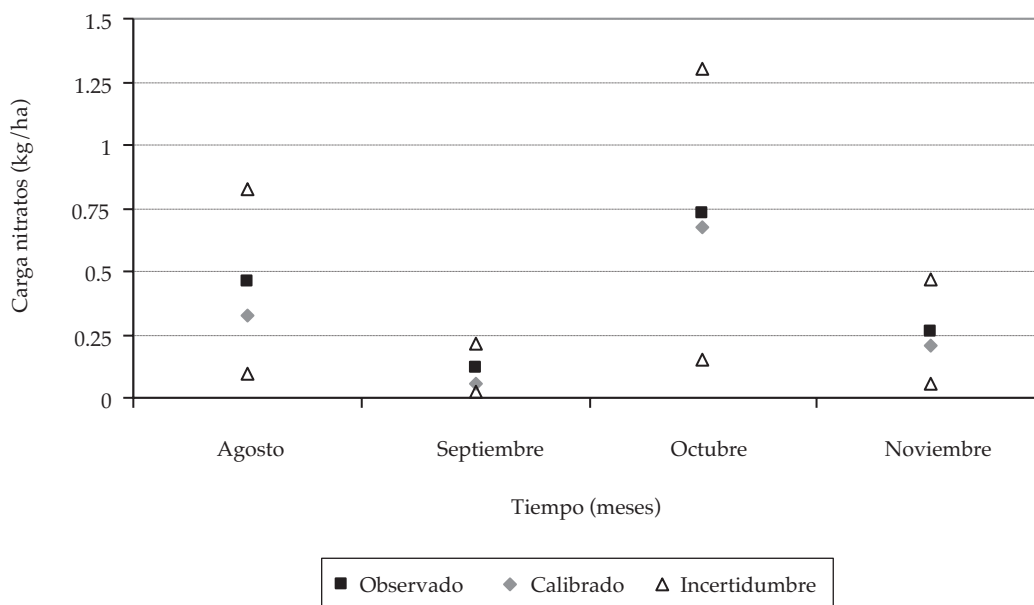


Figura 3. Carga de nitratos.

Los valores de las diferencias en medias y del error estándar del esguerrimiento superficial y de la carga de nitratos para el periodo comprendido entre julio y diciembre, que se corresponde con la aplicación del

fertilizante nitrogenado, se presentan en los cuadros 6 y 7.

El valor del estadístico dm es superior a 2 para los meses de octubre y noviembre (cuadro 6), e indica que existe una diferencia

Cuadro 6. Diferencia entre las medias del escurrimiento superficial. Escenario inicial.

Mes	Dif. El Niño-ST (mm)	Dif. error estándar	<i>dm</i>	Dif. La Niña-ST (mm)	Dif. error estándar	<i>dm</i>
Julio	1.47	3.29	0.45	-1.79	1.18	-1.52
Agosto	0.82	1.56	0.52	-0.08	1.49	-0.06
Septiembre	0.69	1.72	0.40	0.13	0.85	0.15
Octubre	2.01	2.50	0.81	-4.41	1.32	-3.35
Noviembre	0.67	1.88	0.36	-2.62	1.26	-2.09
Diciembre	1.15	1.84	0.63	-1.24	1.05	-1.18

Cuadro 7. Diferencia entre las medias de la carga de nitratos. Escenario inicial.

Mes	Dif. El Niño-ST (kg/ha)	Dif. error estándar	<i>dm</i>	Dif. La Niña-ST (kg/ha)	Dif. error estándar	<i>dm</i>
Julio	0.02	0.06	0.31	-0.02	0.05	-0.39
Agosto	0.03	0.14	0.24	-0.01	0.14	-0.06
Septiembre	0.09	0.13	0.66	0.01	0.06	0.17
Octubre	0.22	0.58	0.39	-0.60	0.36	-1.69
Noviembre	0.01	0.03	0.47	-0.04	0.02	-1.90
Diciembre	0.01	0.03	0.59	-0.02	0.02	-1.26

entre la media del escurrimiento superficial asociado con la fase de La Niña respecto a la media de la serie total.

Para los meses de octubre y noviembre existe una diferencia entre la media de la carga de nitratos asociada con la fase de La Niña respecto a la media de la serie total y el valor del estadístico *dm* es muy próximo a 2 (cuadro 7).

Los valores del estadístico *dm* mostrado en los cuadros 6 y 7, para los meses de octubre y noviembre, son consistentes con los obtenidos para la precipitación (cuadro 2) y muestran la influencia de la precipitación asociada con la fase de La Niña sobre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos.

Se analiza la variación porcentual de los valores medios de las variables precipitación, escurrimiento superficial y carga de nitratos asociadas con las fases de El Niño y La Niña respecto a las medias de las series totales a

partir de los resultados obtenidos con el modelo hidrológico y de calidad de agua (cuadro 8).

El cuadro 8 muestra que para el periodo de tiempo que se aplica el fertilizante nitrogenado, que corresponde a los meses de julio a diciembre, un incremento en la precipitación asociado con la fase de El Niño causa un aumento en el escurrimiento y en la carga de nitratos. Sucede lo contrario en la fase de La Niña, donde una disminución en la precipitación produce una reducción en el escurrimiento y en la carga de nitratos.

Las variaciones en porcentaje en el escurrimiento superficial y la carga de nitratos ocasionadas por los cambios en la precipitación se corresponden con la distribución temporal de la precipitación, el periodo de aplicación del fertilizante nitrogenado y la condición de humedad antecedente. Estos factores afectan las estimaciones del escurrimiento y de la carga de nitratos obtenidos a partir de la aplicación

Cuadro 8. Variación porcentual de los valores medios de las variables hidrológicas y de calidad de agua. Escenario inicial.

Mes	(El Niño-ST)/ST (%)			(La Niña-ST)/ST (%)		
	P	Q	Nitratos	P	Q	Nitratos
Julio	22.8	53.6	20.0	-31.3	-65.2	-21.8
Agosto	19.58	55.3	19.9	-14.5	-6.9	-4.5
Septiembre	20.2	42.9	48.6	5.6	12.5	9.8
Octubre	22.0	42.1	25.1	-32.5	-92.2	-67.6
Noviembre	16.9	30.8	37.5	-26.8	-94.9	-77.8
Diciembre	17.6	46.1	30.5	-8.9	-49.7	-51.9

del modelo *SWRRB-WQ*, que utiliza como variable de entrada la precipitación observada correspondiente a un periodo de treinta años.

Relación entre la carga de fertilizante para los escenarios 1 y 2

Con el propósito de analizar el efecto que produce una mayor o menor aplicación de la carga de fertilizantes nitrogenados, se presentan a continuación los resultados obtenidos del estadístico *dm* para los meses de aplicación de los fertilizantes asociados con los escenarios 1 y 2.

Se aplica el estadístico *dm* para estimar la diferencia entre las medias de la carga de nitratos correspondiente a los escenarios 1 y 2 asociados con las fases de El Niño y La Niña respecto a las medias de las series asociadas de El Niño y La Niña del escenario inicial (cuadro 9).

Se observa que para la fase de El Niño, el estadístico *dm* adquiere un valor superior a 2 para el mes de noviembre. Para los meses de septiembre y octubre, el estadístico tiene un valor próximo a 1.5. Además, la diferencia entre los valores medios es positiva, es decir que existe mayor transporte de la carga de nitratos asociada al escenario 1 en los meses de aplicación del fertilizante nitrogenado.

Con respecto a la fase de La Niña, el estadístico *dm* es próximo a 2 para el mes de noviembre; existe una diferencia de la carga de nitratos asociada con la fase de La Niña y

también las diferencias entre los valores medios es negativa, es decir que existe un menor transporte de la carga de nitratos asociado con el escenario 2 en los meses de aplicación del fertilizante nitrogenado.

Conclusiones

La realización de este trabajo muestra la posibilidad de aplicación de un modelo hidrológico y de calidad de agua para estimar el efecto que tiene la variabilidad interanual de la precipitación observada asociada con las fases del ENOS sobre el escurrimiento superficial y la carga de nitratos transportada por el mismo en distintas escalas temporales.

El análisis realizado con la serie histórica de la precipitación de la estación meteorológica de Azul muestra que en la fase de La Niña se observa una reducción de la precipitación para los meses de octubre y noviembre, y un aumento para el mes de abril asociado con la fase de El Niño. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por diferentes autores en la región pampeana, entre los que se pueden citar Magrin *et al.* (2000, 2005), Sierra (2007), Spescha *et al.* (2004) y Berri *et al.* (2002).

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo *SWRRB-WQ*, que utiliza como variable de entrada la precipitación observada de un periodo de treinta años, muestra que la variabilidad en el escurrimiento superficial y la carga de nitratos debido al efecto de la fase de La Niña es preponderante respecto a la fase

Cuadro 9. Diferencia entre las medias de la carga de nitratos. Escenarios 1 y 2.

Mes	Escenario 1			Escenario 2		
	Dif. El Niño*- El Niño (kg/ha)	Dif. error estándar	<i>dm</i>	Dif. La Niña*- La Niña (kg/ha)	Dif. error estándar	<i>dm</i>
Julio	0.09	0.12	0.70	-0.04	0.05	-0.98
Agosto	0.51	0.53	0.97	-0.10	0.13	-0.09
Septiembre	0.51	0.39	1.31	-0.07	0.06	-1.31
Octubre	3.10	2.18	1.42	-0.10	0.19	-0.52
Noviembre	0.31	0.10	3.08	-0.01	0.006	-1.64
Diciembre	0.03	0.03	0.99	-0.01	0.01	-0.64

*Escenario inicial.

de El Niño para el periodo de aplicación del fertilizante nitrogenado.

También se observa que para la fase de El Niño, cuando se aumenta la carga de fertilizante aplicada, resulta superior la carga de nitratos transportada por el escurrimiento; para la fase de La Niña, a medida que disminuye la carga aplicada, menor es la carga de nitratos que se transporta con el escurrimiento.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al ingeniero Oscar Natale por las revisiones y apreciados comentarios durante el desarrollo del presente trabajo.

Recibido: 27/05/09
Aceptado: 21/02/12

Referencias

- BAGLEY, C.V., KOTUBY-AMACHER, J., and FARRELL-POE, K. *Analysis of water quality for livestock*. UTA State University Cooperative Extensión. CL609-S. *Disponible para World Wide Web*: http://www.extension.usu.edu/files/publications/factsheet/AH_Beef_28.pdf, 1997, 7 pp.
- BERRI, G.J., FLAMENCO, E.A., SPESCHA, L., TANCO, R.A., and HURTADO, R. *La Niña and Its Impacts: Facts and Speculation*. GLANTZ M.H. United Nations University, 2002, pp. 124-133.

- BERBERY, E.H., DOYLE, M., and BARROS, V. Regional precipitation trends. In: *Climate change in the La Plata basin*. Barros V., Clarke, R., and Silva-Días, P. (editors). Buenos Aires: CIMA/CONICET-UBA, 2006, pp. 67-69.
- BIDEGAIN, M., CAFFERA, R.M., BLIXEN, F., PSHENNIKOV, V., LAGOMARSINO, L.L., FORBES, E.A. y NAGY, G.J. *Tendencias Climáticas, Hidrológicas y Oceanográficas en el Río de la Plata y Costa Uruguaya*. En: *El cambio climático en el río de La Plata*. Barros, V., Menéndez, A. y Nagy, G.J. (editores). Buenos Aires: CIMA/CONICET-UBA, 2005, pp. 137-143.
- EFRON, B. and TIBSHIRANI, R. *An introduction to the Bootstrap*. Monographs on Statistics and Applied Probability. New York: Chapman & Hall, 1993, 430 pp.
- GELMI, M. *Aplicación de modelo determinísticos y probabilísticos para el análisis de un fertilizante en una cuenca rural*. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral, 2005, 119 pp.
- GELMI, M. y SEOANE, R. 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*. Vol. 111, 2004, pp. 411-423.
- HARMEL, R.D. and SMITH, P.K. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*. Vol. 337, 2007, pp. 326-336.
- HAYLOCK, M.R., PETERSON, T.C., ALVES, L.M., AMBRIZZI, T., ANUNCIACAO, Y.M.T., BAEZ, J., BARROS, V.R., BERLATO, M.A., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., CORRADI, V., GARCIA, V.J., GRIMM, A.M., KAROLY, D., MARENGO, J.A., MARINO, M.B., MONCUNILL, D.F., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J.L., TREBEJO, I., and VINCENT, L.A. Trends in Total and Extreme

- South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperatura. *Journal of Climate*. American Meteorological Society. Vol. 19, 2006, pp. 1490-1512.
- MAGRIN, G.O., TRAVASSO, M.I., RODRÍGUEZ, G.R., BOULLÓN, D.R., MEIRA, S., GUEVARA, E., VILLALOBOS, R., RETANA, J., COLLADO, J., VILLALOBOS, A., and ROYCE, F. *Comparative Assessment of Agricultural Uses of ENSO-Based Climate Forecasts in Argentina, Costa Rica and Mexico*. Initial Science Program III-Project. Gainesville: University of Florida, 2000, pp. 8-11.
- MAGRIN, G.O., TRAVASSO, M.I. and RODRÍGUEZ, G.R. Changes in climate and crops production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change*. Vol. 72, 2005, pp. 229-249.
- SIERRA, E. *El clima como recurso de la agricultura sustentable*. Buenos Aires, Argentina, febrero de 2007. Disponible para Word Wide Web: http://www.agro.uba.ar/carreras/agronomia/materias/taller_II/tallerII-clima-2007.pdf. 2007. pp. 1-39.
- SPESCHA, L., FORTE LAY, J., SCARPATI, O. y HURTADO, R. *Revista Facultad de Agronomía*. Vol. 24, núm. 2, 2004, pp. 161-167.
- TRENBERTH, K.E. The Definition of El Niño. *Bulletin American Meteorology Society*. Vol 78, 1997, pp. 2771-2777.

Abstract

GELMI, M. & SANTIAGO-SEOANE, R. Nitrate loads estimation in a rural basin and its relationship with the climate variability. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 21-34.

The objective of this work is to study the ability of the Simulator for Water Resources in Rural Basins – Water Quality (SWRRB-WQ) model to estimate the load of nitrogenous fertilizer transported by surface runoff in a sub-basin of the Tapalqué River (Buenos Aires Province, Argentina). Also discussed is the impact of the climatic variability resulting from El Niño Southern Oscillation (ENSO) phases on runoff and fertilizer load. The SWRRB-WQ model consists mainly of a representation of the hydrology and water quality associated with a hydrometeorological variables generator. Precipitation data from the meteorological station located in Azul was used for the period 1961-1990 as input to the SWRRB-WQ in order to analyze the variability of surface runoff and nitrate load in a control section located at the outlet of the basin under study. The results of this analysis show the effect of the variability observed in the precipitation associated with ENSO phases on surface runoff and transported nitrate loads at different time scales.

Keywords: climatic variability, hydrological and water quality models, nitrate.

Dirección institucional de los autores

M.C. *Mónica Gelmi*

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de la Provincia de Buenos Aires
Avenida del valle 5400
Olavarría, Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA
Teléfonos: +54 (0228) 4451 055 y 4451 056, extensión 233
mgelmi@fio.unicen.edu.ar

Ing. Rafael Santiago Seoane

Instituto Nacional del Agua
Au. Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery, km 1 620,
C.C. núm. 46
1802 Ezeiza, Buenos Aires, ARGENTINA
Teléfono: +54 (11) 4983 3736
rafaelseoane@yahoo.com
rseoane@ina.gov.ar