MODELADO EN GEOFISICA APLICADO AL TRANSPORTE DE NITRATO EN AGUAS SUBTERRANEAS

Jacqueline Köhn[1]; Eduardo E. Kruse[2] & Juan E. Santos[3]

Resumen - Un modelo numérico es utilizado para predecir la contaminación por nitrato en aguas subterráneas provenientes del uso de fertilizantes en áreas rurales. La técnica numérica implementada para la resolución de la ecuación de transporte de nitrato es el método iterativo mixto de características. El campo de flujo subterráneo se supuso constante y el transporte de nitrato se considera conservativo y sólo afectado por efectos de dispersión y convección. Se resuelve un caso hipotético para analizar la evolución de la concentración de nitratos en aguas subterráneas en zonas de cultivo. Se destaca la utilidad de este tipo de modelos, ya que permiten simular el posible estado de contaminación y la predicción de los efectos negativos que se originan en la calidad química del agua subterránea.

Palabras claves - nitrato, modelado, contaminación

INTRODUCCION

Las fuentes de nitrato en el subsuelo se deben a procesos naturales y antrópicos: fertilizantes, pesticidas, desechos animales, industriales y humanos. El comportamiento del nitrato está condicionado a características de reducción y oxidación del ambiente causado por fenómenos principalmente biológicos.

[1] CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina. TE. 221-54-423-6593, Fax 221-54-423-6591, e-mail: jkohn@fcaglp.edu.ar
[2] CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina. TE. 221-54-423-6593, Fax 221-54-423-6591, e-mail: kruse@fcaglp.edu.ar
[3] CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina. TE. 221-54-423-6593, Fax 221-54-423-6591e-mail: santos@fcaglp.edu.ar y Departament of Mathematics, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA. e-mail: santos@math.purdue.edu.

Excesivas proporciones de nitrato en el agua para consumo humano pueden causar metahemoglobinemia en niños pequeños: concentraciones mayores de 10 mg/l de nitrógeno, equivalente a 44 mg/l de nitrato, los expone a este riesgo (Hem, 1985).

Las actividades relacionadas a la agricultura pueden resultar una fuente de contaminación por nitrato, debido a su alta movilidad y persistencia en el ambiente (Ling y El-Kadi, 1998).

La concentración de nitratos en aguas subterráneas en terrenos donde se usan fertilizantes nitrogenados está en el rango de 5 a 100 mg/l (Canter, 1997). En algunas áreas rurales, las zonas con concentraciones de más de 100 mg/l de nitrato coinciden con zonas de cultivo (Mugni y Kruse, 1993).

En los últimos años, diversas investigaciones han conducido al estudio del comportamiento del nitrato y su potencial impacto ambiental (Mehran et al., 1984).

En la literatura existen distintos modelos desarrollados que describen el transporte de nitrógeno y nitratos en el subsuelo. El rango de modelos es amplio y abarca desde los estadísticos hasta aquellos acoplados para la zona no saturada y saturada (Canter, 1997).

El objetivo de este trabajo es presentar un modelo numérico empleando un método iterativo mixto de características para resolver la ecuación del transporte de nitrato en la zona saturada y aplicarlo a un caso genérico de contaminación en una porción de acuífero.

MODELO

Utilizando la ley de Darcy y el principio de conservación de masa se pueden plantear las ecuaciones necesarias para el modelo. El flujo del agua subterránea q dado por la ley de Darcy se expresa por

$$q = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho\, g\, \nabla z) \qquad (1)$$

siendo k es la permeabilidad específica, μ es la viscosidad dinámica del fluido, ρ la densidad del medio, g la gravedad, p la presión, z la profundidad.

El transporte de nitrato bajo un campo de flujo en un dominio bidimensional puede ser expresado por

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (D \nabla C) - q \cdot \nabla C = f \qquad \text{en} \quad \Omega \qquad (2)$$

donde Ω = dominio, θ = porosidad, C= concentración de contaminante, D = coeficiente de dispersión, f = fuente de contaminación de nitrato.

El nitrato es tratado como un soluto conservativo y la concentración en el acuífero es afectada sólo por fenómenos de dispersión y convección.

La condición de borde para la ecuación (2) es

$$D\nabla C \cdot \nu = 0 \qquad \text{en} \qquad \partial\,\Omega \tag{3}$$

que implica que el contaminante no se difunde a través del borde ($\partial\ \Omega$), pero podría escapar, y de hecho lo hace, por convección. La condición de Neumann con gradiente cero es usada en los límites impermeables, los cuales constituyen el límite inferior, los límites laterales y el límite superior del acuífero.

La ecuación de advección-difusión describe el transporte en presencia de un campo de velocidad y un efecto difusivo modelado por el coeficiente de dispersión hidrodinámica D.

El tensor de dispersión hidrodinámica D (d_{ij}) está definido como (Bear, 1979)

$$d_{ij} = \alpha_T|\nu| + (\alpha_L - \alpha_T)\frac{u_i u_j}{|\nu|} + \delta \qquad i = j \tag{4}$$

$$d_{ij} = (\alpha_L - \alpha_T)\frac{u_i u_j}{|\nu|} \qquad i \neq j \tag{5}$$

donde α_L = dispersividad longitudinal, α_T = dispersividad transversal, u_i, u_j = componentes de la velocidad de flujo, δ = coeficiente de difusión molecular, $|\nu|$ = módulo de la velocidad.

En medios porosos naturales y estratificados con flujo a lo largo de las estratificaciones, la dispersión no es isotrópica. El tensor de dispersión debe ser modificado con el uso de una dispersividad transversal horizontal y otra transversal vertical (Burnett and Frind, 1987).

La técnica numérica utilizada para la resolución de la ecuación de transporte es un método iterativo mixto de características. Esta técnica de “operator spliting” permite eliminar la falta de simetría debido a la presencia del término convectivo y elimina las oscilaciones numéricas espúreas. El procedimiento iterativo es del tipo de descomposición de dominio y el algoritmo se aplica para el caso en que los subdominios coinciden con las celdas que particionan al dominio.

Para la implementación del método de característica se realizan algunos cambios de variables y denominando

$$\tilde{x}^n = x - \frac{\vec{q}^n}{\theta^n}\Delta t \qquad (6)$$

$$\vec{U} = -D(\vec{q})\nabla C \qquad (7)$$

el sistema a resolver, una vez discretizado, es

$$\theta^n \frac{C(x,t^n) - C(\tilde{x},t^{n-1})}{\Delta t} + \nabla . U^n = f \qquad \text{en} \quad \Omega \qquad (8)$$

$$\vec{U}^n \left(D(\vec{q}) \right)^{-1} + \nabla \cdot C^n = 0 \qquad \text{en} \quad \Omega \qquad (9)$$

$$\vec{U}^n \cdot \nu = 0 \qquad \text{en} \quad \partial\Omega \qquad (10)$$

El valor de la concentración: $C(\tilde{x},t^{n-1}) = \tilde{C}$ se obtiene realizando una interpolación areal entre las celdas del dominio. Esta forma de resolución elimina la necesidad de almacenar y resolver en forma global el sistema algebraico, lo que es imprescindible cuando el número de incógnitas es grande.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Para ilustrar la capacidad del modelo para predecir la distribución de nitratos en la zona saturada se planteó un problema hipotético. El dominio de simulación considerado fue una sección transversal del acuífero de 300 m de longitud y 40 m de espesor. La fuente de nitrato se consideró continua y dispersa abarcando una extensión horizontal de 150 m aproximadamente sobre el nivel freático, a 5 m de profundidad. La concentración inicial fue de 100 mg/l, representativa de zonas afectadas por el uso de fertilizantes nitrogenados.

Se empleó una velocidad de Darcy horizontal constante de 0.01 m/día y vertical de 0.001 m/día. Los coeficientes de dispersión fueron calculados a partir de las ecuaciones (4) y (5) usando $\delta = 5\text{x}10^{-5}$ m^2 por día, $\alpha_L = 1$ m y $\alpha_T = 0.5$ m (Frind and Germain, 1986).

En el caso presentado se consideró que los sedimentos próximos a la superficie del terreno corresponden a materiales limo-arenosos y se adoptó una porosidad de 0.15.

En la fig. 1 se muestra la condición inicial del sistema y el avance del frente de nitrato luego de 200 y 350 días se observa en las figuras 2 y 3. Los contornos están en mg/l.

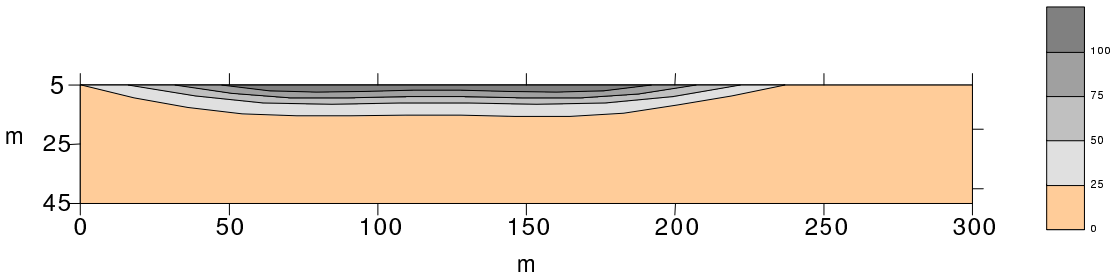

Fig. 1. Perfiles de concentración de nitrato (mg/l), estado inicial.

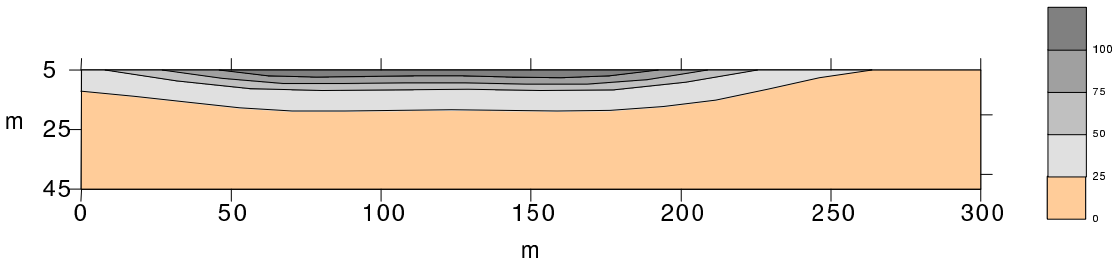

Fig. 2. Perfiles de concentración de nitrato luego de 200 días de transporte (mg/l)

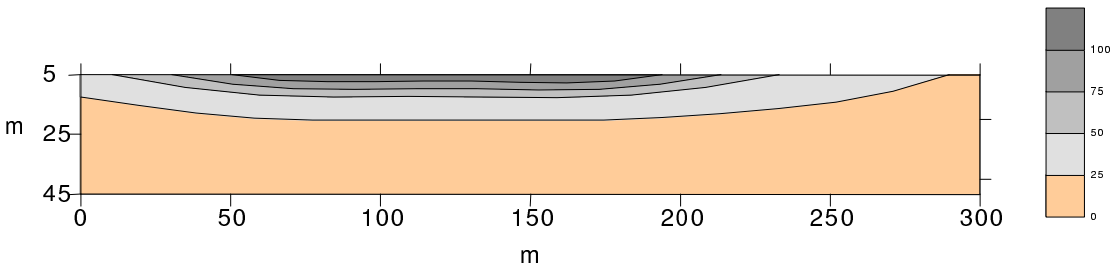

Fig. 3. Perfiles de concentración de nitrato luego de 350 días de transporte (mg/l)

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado aquí utilizando el método iterativo mixto de características provee una solución aproximada para obtener el transporte de nitrato en zonas saturadas.

Como aplicación, se estimó la migración del nitrato a partir de una fuente dispersa originada por el uso de fertilizantes nitrogenados. Los resultados obtenidos sugieren que en un medio acuífero homogéneo, luego de un año de acción continua de la fuente, los efectos se producen en la parte superior del acuífero, en cambio a mayor profundidad (20 m) no se verifica la influencia del proceso contaminante. Esto sería razonable debido a que el flujo subterráneo es aproximadamente horizontal y es poco probable que el nitrato alcance las capas más profundas durante plazos cortos de tiempo.

El nitrato reduce las reservas disponibles de agua para el servicio público, por lo tanto es de interés este tipo de modelado ya que representa a una herramienta práctica y eficiente para el estudio y predicción de los efectos ambientales ocasionados en sistemas acuíferos por el transporte de nitrato originado en actividades agrícolas que usan fertilizantes nitrogenados.

REFERENCIAS

Bear, J., 1979. Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, New York.

Burnett R. D. and Frind E. O. 1987. Simulation of Contaminant Transport in Three Dimensions. 2. Dimensionality Effects, Water Resour. Res., Vol. 23, No 3, 695-705.

Canter L. C., 1997, Nitrates in Groundwater, Lewis Publishers, New York.

Frind E. O. and Germain D., 1986, Simulation of Contaminant Plumes With Large Dispersive Contrast: Evaluation of Alternating Direction Galerkin Models, Water Resour. Res., Vol 22, No13, 1857-1873.

Hem, J. H., 1985. Study and Interpretation of the chemical Characteristics of Natural Water. 3rd. Edition, U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 2254, Alexandria (USA).

Ling G. and El-Kadi A. I., 1998, A lumped parameter model for nitrogen transformation in the unsaturated zone, Water Resour. Res., Vol. 34, No 2, 203-212

Mehran M., Noorsishad J. and Tanji K K., 1984, Numerical Technique for Simulation of the Effect of Soil Nitrogen Transport and Transformations on Groundwater Contamination, Environmental Geology, Vol. 5, No. 4, 213-218.

Mugni, J. and Kruse E. 1993. Nitrate evolution in Groundwater in the Buenos Aires Province (Argentina); Environmental Pollution, ICEP 2, European Centre for Pollution Research, 225-231.