

## Resumen

Los modelos de ayuda a la toma de decisiones cumplen un rol de importancia en la gestión ambiental del territorio; en este sentido, la ingeniería ambiental constituye una rama del conocimiento apropiada para llevar adelante estos desarrollos. El objetivo del trabajo es evaluar la peligrosidad de contaminación del agua subterránea en una cuenca donde el uso del suelo es esencialmente rural productivo. Esta evaluación se realizó utilizando lógica difusa de predicados que se formalizaron a partir de dos grandes grupos de variables: vulnerabilidad del acuífero (de un trabajo antecedente) y carga contaminante potencial. El mapa final de peligrosidad de contaminación del agua subterránea muestra que en las zonas donde la carga contaminante es alta y la vulnerabilidad es alta, la peligrosidad de contaminación es muy alta. Asimismo, en las zonas donde la carga contaminante es alta y la vulnerabilidad del acuífero es baja, la peligrosidad de contaminación es moderada, como se puede observar en la cabecera de la cuenca.

**Palabras clave:** peligrosidad, contaminación, agua subterránea.

## Abstract

Decision support systems play an important role in land use management. In this sense, Environmental Engineering is a branch of knowledge suitable to carry out these developments. The aim of this work is to assess the groundwater pollution hazard in a basin where land use is essentially rural productive. This assessment is performed using fuzzy logic predicates with numerical variables. In order to select those variables, there are considered two aspects: groundwater vulnerability (from a previous work) and potential pollutant load. The final map of groundwater pollution hazard shows that in areas where both the pollutant load and the groundwater vulnerability are high, the groundwater pollution hazard is very high. Moreover, in areas where the pollutant load is high and the groundwater vulnerability is low, the groundwater pollution hazard is moderate, as seen in the southwest of the basin.

**Keywords:** hazard, pollution, groundwater.

## Introducción

La gestión ambiental (GA) puede ser definida como el “conjunto de acciones encaminadas a lograr la máxima racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejoramiento del Medio Ambiente, basándose en una coordinada información mul-

# Evaluación de la peligrosidad de contaminación del agua subterránea mediante lógica difusa

Héctor Massone<sup>1,3</sup>, M. Lourdes Lima<sup>1,3,4</sup>, Gustavo Meschino<sup>1,2</sup>, Daniel Albornoz<sup>1</sup>, Fernanda Damiano<sup>1</sup> y Agustina Barilari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad FASTA

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

<sup>3</sup> Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Universidad Nacional de Mar del Plata. massoneh@gmail.com

<sup>4</sup> CONICET

Este trabajo fue financiado mediante un subsidio de investigación de la Facultad de Ingeniería de UFASTA

tidisciplinaria y en la participación ciudadana” [1]. En este contexto, es posible diferenciar dos grandes aproximaciones: la gestión ambiental de las organizaciones y la gestión ambiental del territorio. Obviamente existe una diferenciación fundamental entre ambas que es la escala: mientras que en el primer caso el trabajo es territorialmente puntual, en el segundo es claramente regional. En ambos casos, pero quizás mucho más notoriamente en la GA del territorio, los tomadores de decisión encuentran dificultades a la hora de contar con información adecuadamente relevada, compilada e interpretada que les permita proceder con el menor grado de incertidumbre posible. En este sentido, los sistemas de soporte a la toma de decisión (DSS) se han desarrollado para facilitar el proceso de toma de decisiones a través de herramientas cualitativas basadas en el conocimiento de expertos [2]. Una característica importante de estos sistemas es que permiten tomar en cuenta conocimiento especializado proveniente de un espectro muy amplio tanto de las ciencias naturales, como de las sociales, ingenierías, etc. [3]. En este trabajo se pretende contribuir con el proceso de toma de decisión

en el campo de la GA territorial, a través de una evaluación de la peligrosidad de contaminación del agua subterránea en una cuenca rural próxima a la ciudad de Mar del Plata. La aproximación metodológica tomada para este trabajo en relación a la peligrosidad de contaminación del agua subterránea es la propuesta por Massone y Martínez [4], considerándola como la interacción entre vulnerabilidad intrínseca del acuífero y la carga contaminante potencial que puede ser descargada al subsuelo.

La teoría de la lógica difusa, basada en conjuntos difusos, fue propuesta por Zadeh [5], y establece que un sistema complejo puede representarse mejor por variables descriptivas lingüísticas que por la representación tradicional de ecuaciones diferenciales [6]. La investigación ha demostrado que los modelos basados en reglas difusas son capaces de producir resultados comparables utilizando cerca del 40% menos de variables [7]. La estrategia de aproximación basada en reglas difusas se ha utilizado en estudios de transporte de solutos [8] y para evaluar el potencial de un acuífero a la contaminación ([9]; [10]). A pesar de que los principales aspectos de esta teoría y sus resultados son notables en el área de Control, han ido surgiendo algunos planteos desde el punto de vista teórico. El uso de reglas simples es una de las principales ventajas de los sistemas de inferencia difusa. Sin embargo, la necesidad de la definición de las operaciones de agregación y defuzzificación aleja a estos modelos de la generalización de los paradigmas de la lógica booleana. La defuzzificación actúa como un grado de libertad en un modelo basado en la combinación pragmática de operadores, pero sin un enlace axiomático armónico que justifique la denominación de "Lógica" ([11]; [12]). Es por esta causa que en este trabajo proponemos el uso de lógica de predicados difusos, que es una extensión natural de la lógica booleana, de simple interpretabilidad lingüística.

### Área de estudio

La cuenca del Arroyo El Dulce (1000 km<sup>2</sup>) está situada en el sureste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, entre las ciudades de Mar del Plata y Balcarce. Desemboca en la laguna Mar Chiquita (Figura 1) y constituye una parte del territorio de la llanura pampeana húmeda. El área de estudio se eligió de acuerdo a criterios que incluyen el alto

nivel de las actividades agrícolas y de los amplios datos disponibles sobre la geología del acuífero. Desde el punto de vista hidrogeológico esta área implica un acuífero freático con una extracción local significativa del recurso hídrico para bebida y para riego. La zona es de clima "moderado-húmedo" (en la clasificación de Köppen). En los últimos 20 años, las precipitaciones medias anuales en la región han oscilado entre 960 a 1170 mm, mientras que la temperatura media en verano es de 20° y 10° C en invierno.

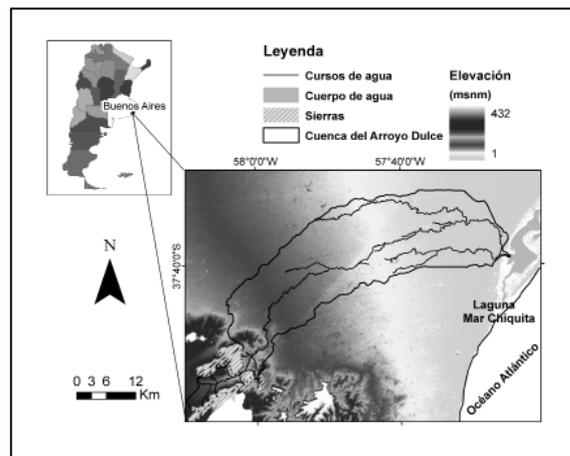


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

### Evaluación de la peligrosidad de contaminación mediante predicados difusos

En este apartado, se dan algunas definiciones básicas sobre la lógica de predicados difusos.

Los predicados tienen diferentes interpretaciones en matemática y lógica. En este trabajo, se considera "predicado" como un sinónimo de "proposición". En la lógica tradicional y la filosofía, este término se refiere al contenido de una sentencia declarativa que incluye la posibilidad de ser verdadera o falsa. O desde otro punto de vista, los predicados pueden tener un valor de verdad asociado a los valores 0 (falso) o 1 (verdadero). Este enfoque permite generalizar esta definición para considerar predicados difusos, como se ve en las siguientes definiciones.

**Definición 1.** Un predicado  $p$  difuso es una expresión lingüística (una proposición), con grado de verdad  $u(p)$  en el intervalo  $[0, 1]$ . Se aplica el "principio de gradualidad", que establece que una proposición puede ser a la vez verdadera y falsa, que tiene un cierto grado de verdad (o falsedad) asignado.

**Definición 2.** Un predicado difuso simple,  $sp$ , es una sentencia cuyo grado de verdad  $u(sp)$  se

puede obtener por algunas de las alternativas siguientes:

- La aplicación a una variable cuantitativa de una función de pertenencia asociada con un término difuso,
- La asociación de valores discretos en el intervalo  $[0, 1]$  para etiquetas lingüísticas (generalmente adjetivos) de una variable.
- La determinación directa del valor en el intervalo  $[0, 1]$  por parte de un experto.

**Definición 3.** Los Predicados compuestos se pueden representar como una estructura de árbol, que tiene sus nodos asociados por conectivas lógicas y sus ramas sucesivas relacionadas con los predicados de menor nivel jerárquico (simples o compuestos).

Es necesario definir una lógica (un sistema de operaciones entre valores de verdad) donde las operaciones de conjunción, disyunción y la negación sean funciones definidas sobre un conjunto de valores de verdad para predicados, en el intervalo real  $[0, 1]$ , tal que cuando los valores de verdad se limitan a  $\{0, 1\}$ , estas operaciones se convierten en predicados booleanos clásicos [13]. Para este trabajo, se han elegido los operadores de la lógica compensatoria basados en la media geométrica (GMBCL). Estos operadores han demostrado ser adecuados para la implementación de modelos lingüísticos basados en predicados difusos provenientes de diferentes campos de investigación ([14]; [15]; [16]; [17], [18]).

El operador de conjunción entre grados de verdad de  $N$  predicados difusos  $\mu_i, i = 1, 2, \dots, N$  en este sistema, se define como:

$$C(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)^{\frac{1}{N}} \quad (1)$$

La característica fundamental que hace los sistemas compensatorios es la sensibilidad del resultado al valor de todos los operandos, lo que no ocurre con otras operaciones de conjunción más utilizados, como el operador "mínimo". De esta manera, el valor de la relación puede ser influenciado por, y por lo tanto "compensada" por el valor de cualquiera de los grados de verdad considerados.

Metodológicamente el trabajo que se presenta consistió en complementar a la evaluación de la vulnerabilidad de contaminación realizada en un

trabajo anterior [18], con la evaluación de la carga contaminante potencial. Así, en términos generales, el mapa de peligrosidad de contaminación del agua subterránea obtenido contempla tanto la vulnerabilidad del acuífero, característica intrínseca del sistema natural, como la carga contaminante potencial, característica externa al medio.

El desarrollo metodológico incluyó tres etapas, a saber:

#### **Etapla 1:** Selección de las variables a utilizar.

Dado el carácter de análisis regional que tiene este trabajo, se decidió emplear el uso del suelo como variable determinante a la hora de evaluar cargas contaminantes potenciales al subsuelo. De esta manera, y para esta primera aproximación, se identificaron 3 usos del suelo: áreas rurales productivas, áreas residenciales sin red de saneamiento y actividades que sean en zonas rurales o urbanas pero espacialmente puntuales y con alta posibilidad de generar impactos negativos en el medio subterráneo (concretamente se trabajó con feedlots, basureros a cielo abierto y minería de suelos).

#### **Etapla 2:** Construcción del árbol de predicados y funciones de pertenencia.

La variable uso del suelo fue considerada en los predicados lingüísticos siguientes:

- La peligrosidad de contaminación del agua subterránea es alta cuando el acuífero es vulnerable y la carga contaminante potencial es alta.
- La carga contaminante potencial es alta cuando el uso del suelo es rural productivo, o urbano sin saneamiento, o se desarrolla una actividad espacialmente puntual y de posible alto impacto.

Formalmente:

$P(x)$  = "EL peligro de contaminación  $x$  es alto cuando el acuífero es vulnerable y la carga contaminante potencial es alta."

$P(x) = V(x) \text{ y } C(x)$ , donde

$V(x)$  = "El acuífero es vulnerable."  $C(x)$  = "La carga contaminante potencial es alta"

El detalle de la construcción del predicado  $V(x)$  puede ser analizado en Albornoz et al. [18].

La estructura completa de predicados difusos se puede representar como un árbol, como se muestra en la Figura 2.

identificaron cuatro tipos de uso del suelo: Cultivos (superficie con cultivos agrícolas anuales, de verano o invierno) se considera la peor situación

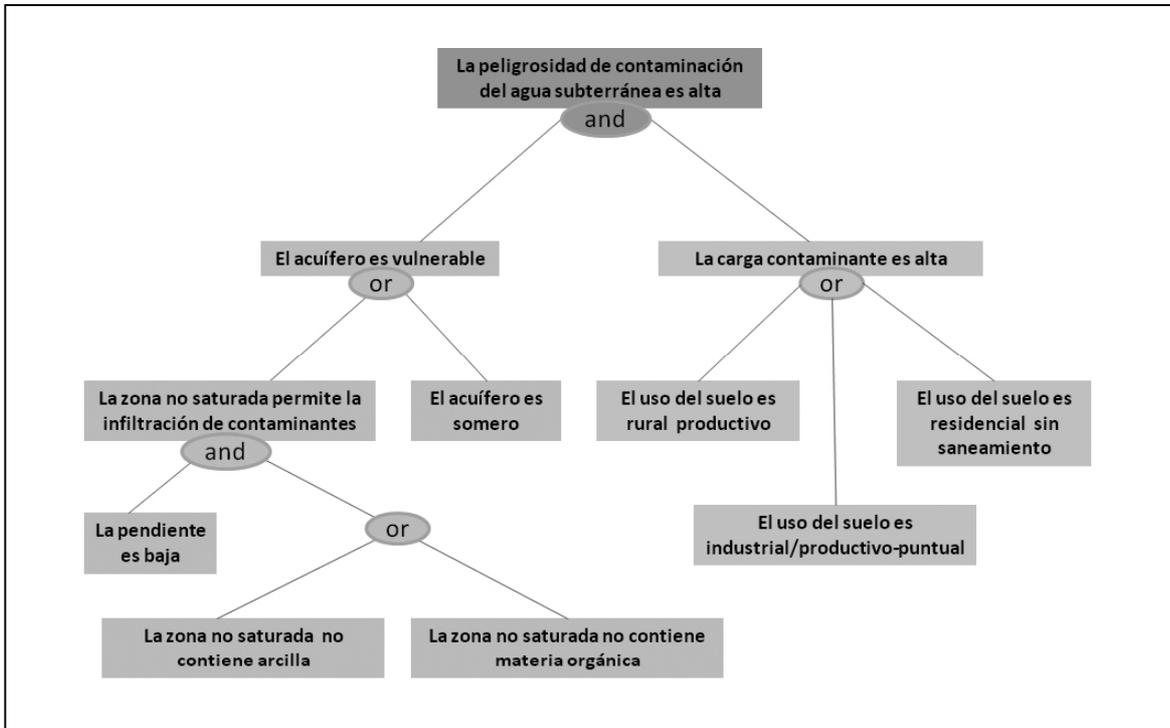


Figura 2. Árbol de predicados: comienza evaluando el valor de verdad de las hojas y se opera hasta obtener el valor de verdad del predicado principal raíz. Los recuadros verdes se desarrollan en Albornoz et al. [18].

### Etapas 3: Evaluación de la peligrosidad de contaminación.

Mediante el software STF [18] que opera en entorno MATLAB se evalúa píxel a píxel el conjunto de predicados difusos, devolviendo finalmente un valor de verdad de peligrosidad de contaminación. Por último, el grado de verdad del predicado principal (lo que indica el peligro de contaminación del agua subterránea) se representa mediante una escala de colores en un mapa.

### Resultados

Para cada una de las variables seleccionadas se obtuvo un mapa temático en formato raster con píxeles de 100x100 m<sup>2</sup>, en la plataforma SIG. Se establecieron las siguientes condiciones para cada predicado:

“El uso del suelo es rural productivo”. Se tomó de base el mapa de uso del suelo [19] para la elaboración del mapa de carga contaminante potencial. Se distinguieron las principales actividades contaminantes en la zona, donde se

con un valor asignado de 0.9; Pasturas (pasturas sembradas, sin discriminar su edad) se considera como situación intermedia, con un valor signado de 0.5; Pastizal (praderas naturales, pudiendo tener rastros de la intervención humana) y Otros (que abarca lo relativo a áreas con vegetación arbórea natural, áreas con presencia de agua en superficie y sierras) se considera la mejor situación, con valor 0.0.

“El uso del suelo es residencial sin saneamiento”: la propuesta para este predicado es tomar la clasificación utilizada en el método POSH [20] considerando el porcentaje de cobertura y la densidad de población, así la peor situación (valor 0.9) corresponde a cobertura cloacal menor del 25% y una densidad poblacional mayor a 100 hab/ha, mientras que la mejor situación estaría en el rango de cobertura mayor a un 75% y densidad poblacional menor de 50 hab/ha (valor 0.2).

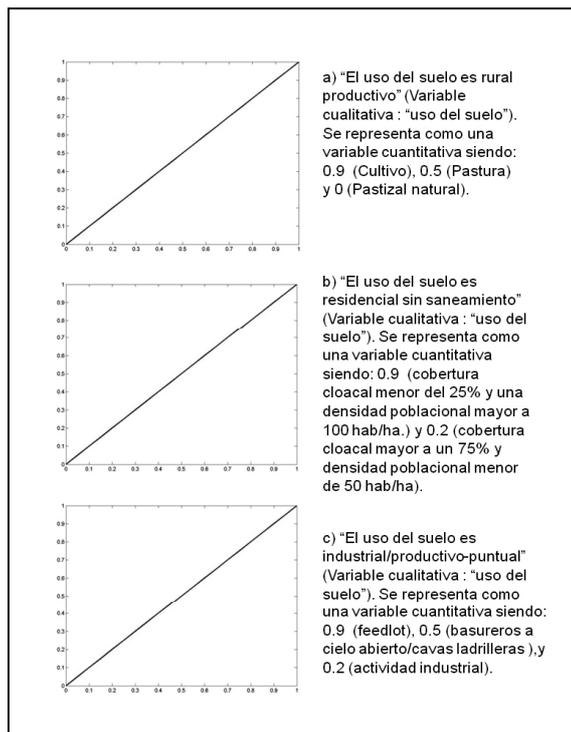
“El uso del suelo es industrial/productivo-puntual”; este es el predicado en el que menos se ha trabajado hasta el momento; a priori y en base a la realidad regional, se asigna la peor situación

a feedlot (0.9), la intermedia a basureros a cielo abierto/cavas ladrilleras (0.5) y la mejor a actividad industrial (suele ser la más controlada) con valor de 0.2.

Por ser la zona de estudio un área estrictamente rural, en este trabajo se ha utilizado solo el primero de los predicados propuestos.

Con el software STF se realizó la especificación y la evaluación numérica de los predicados difusos. La variable de entrada es una matriz equidimensional procedente del mapa de uso del suelo [19] en formato raster. La respuesta de salida es una matriz con el mismo formato. Por otra parte, la matriz de salida se puede vincular mediante una interfaz de archivo de texto para el intercambio de información con herramientas SIG.

Mediante este mismo software, para cada predicado fue seleccionada una función de pertenencia recta para la cuantificación de su valor de verdad (Figura 3):

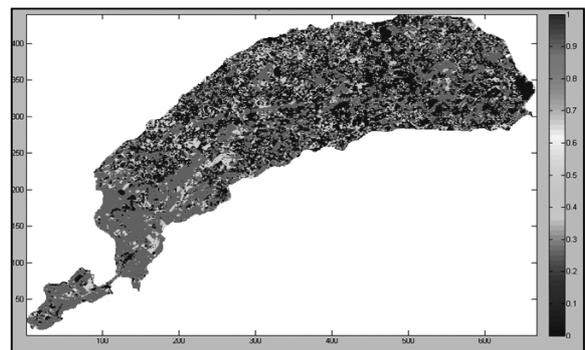


**Figura 3.** Funciones de pertenencia seleccionadas para cada variable. a) "El uso del suelo es rural productivo". b) "El uso del suelo es residencial sin saneamiento". c) "El uso del suelo es industrial/productivo-puntual".

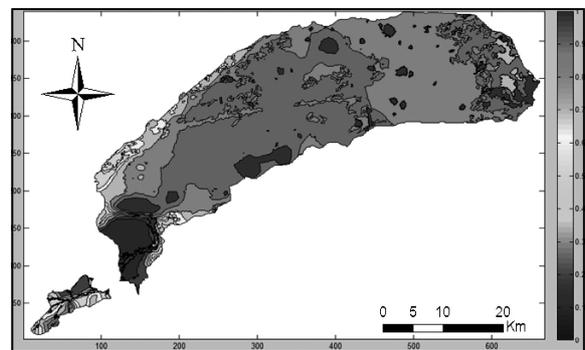
En el entorno de STF se obtuvo el mapa de carga contaminante potencial que fue combinado píxel a píxel con el mapa de vulnerabilidad del acuífero (Figura 4a, 4b, respectivamente) para

obtener el mapa final de peligrosidad de contaminación del agua subterránea (Figura 5).

El mapa resultado (Figura 5) muestra que existen áreas tanto con alto como con bajo valor de verdad distribuidas en toda la extensión de la cuenca estudiada; sin embargo, es posible advertir que las zonas central-sur, central-oeste y los extremos sudoeste y este serían las más problemáticas, con una concentración mayor de "áreas rojas"; el área sudoeste, por su parte, muestra una mayor concentración de bajos a moderados valores de verdad (áreas azules-celestes).



**Figura 4.a.** Mapa de carga contaminante potencial.



**Figura 4.b.** Mapa de vulnerabilidad. Fuente: (18)

### Discusion y conclusiones

El mapa final de peligrosidad de contaminación muestra un aspecto que resulta de interés para la discusión, y es el hecho de la combinación de vulnerabilidad del acuífero y carga contaminante cuando estas variables entregan resultados diferentes en un mismo píxel. Un buen ejemplo de ello puede observarse en el sector sudoeste de la cuenca, donde la vulnerabilidad del acuífero toma valores de verdad de entre 0.5 y 0.2, mientras que la carga contaminante potencial entrega resultados entre 0.8 y 0.9; como resultado, el mapa de peligrosidad ofrece para esta misma área valores de verdad entre 0.1 y 0.4. En términos de toma

de decisiones, el escenario que ofrece el mapa de vulnerabilidad para ésta zona es muy permisivo, mientras que el ofrecido por el de carga contaminante potencial es mucho más restrictivo o bien, podría interpretarse como que en el primer caso la necesidad de control es mucho menor que en el segundo. Este aspecto, resalta la importancia de contar con el mapa de peligrosidad para la toma de decisiones ya que considera ambas situaciones, y también pone de relevancia la importancia que para el tomador de decisión tiene conocer el metadato, es decir, el procedimiento de construcción del mismo, ya que la eficacia de su aplicación (o bien la de los mapas de origen), dependerá del objetivo que se pretenda alcanzar.

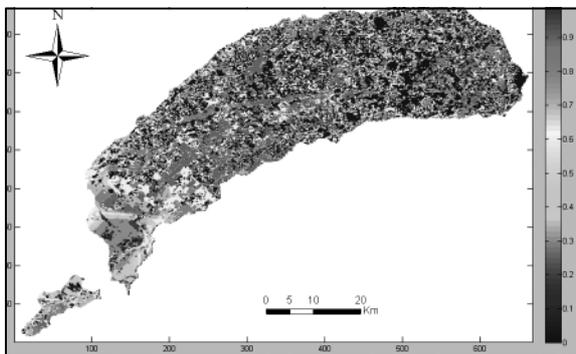


Figura 5. Mapa final de peligrosidad de contaminación del agua subterránea.

## Referencias

[1] CONESA, V. (1994) Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Mundi-Prensa Libros, Madrid, 800 pág.

[2] SEWILAM, H., BARTUSSECK, S., NACKEN, H. (2007). Rule-based decision support system for the morphological rehabilitation of watercourses. *Water Resources Management*, 21 (12), 2037–2047.

[3] RIZZOLI, A. E., YOUNG, W. Y. (1997). Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques. *Environmental Modelling and Software*, 12(23), 237–249

[4] MASSONE, H. y D. MARTINEZ, (2008). Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. Publicación especial, *Revista Ingenierías*, Universidad de Medellín, Vol. 7 Núm. 12, 9-22. ISSN 1692-3324 Colombia..

[5] ZADEH, L. (1965). Fuzzy sets, *Information and Control*, 8: 338–353.

[6] COX, E. (1994). *The fuzzy systems handbook*. London: Academic Press.

[7] BARDOSSY, A., DISSE, M. (1993). Fuzzy rule-based models for infiltration. *Water Resources Research*, 29(2), 373–382.

[8] DOU, C., WOLT, W., BOGARDI, I. (1999). Fuzzy rule-based approach to describe solute transport in the unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 220(1-2), 74–85.

[9] DIXON, B., SCOTT H.D., DIXON J.C., STEELE K.F. (2002). Prediction of Aquifer Vulnerability to Pesticides Using Fuzzy Rule-Based Models at the Regional Scale. *Physical Geography* 23:130 – 152.

[10] GEMITZI, A., PETALAS, C., TSIHRINTZIS, V.A., PISINARAS, V. (2006). Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environ. Geol.*, 49, 653-673.

[11] PASSINO, K., YORKOVICH, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison Wesley. New York.

[12] ZIMMERMANN, H.J. (1996). *Fuzzy Set Theory and its applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London.

[13] BOUCHET, A., PASTORE, J.I., ESPÍN ANDRADE, R., BRUN, M., BALLARIN, V.L. (2011). Arithmetic Mean Based Compensatory Fuzzy Logic. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, Vol. 10, No. 2 1–13, DOI: 10.1142/S1469026811003070.

[14] MESCHINO, G.J., BALLARIN, V.L., ESPIN ANDRADE, R.A. (2011). Image segmentation with predicates analysis and Compensatory Fuzzy Logic. In: (eds.) Editorial Shaker Verlag, Universidad de Oldenburgo, pp. 210-25. Editorial Shaker Verlag, Universidad de Oldenburgo, Oldenburgo, Alemania.

[15] PASSONI, L.I., MESCHINO, G.J., GESUALDO, S., MONJEAU, A. (2011). Fuzzy Tree Studio: una herramienta para el diseño del tablero de mando para la gestión de áreas protegidas. III Taller Internacional de Descubrimiento de Conocimiento, Gestión del Conocimiento y Toma de Decisiones, Santander, Cantabria, España.

[16] GONZÁLEZ, M.A., MESCHINO, G.J., ESPIN ANDRADE, R.A., BALLARIN, V.L. (2011). Classification of over-segmented regions result of the watershed transform through Compensatory Logic. In: (eds.) Editorial Shaker Verlag, Universidad de Oldenburgo, pp. 161-8. Editorial Shaker Verlag, Universidad de Oldenburgo, Oldenburgo, Alemania.

[17] D'ONOFRIO, M.V., GONZALEZ, M.A., MESCHINO, G.J., BALLARIN, V.L. (2011). Quantification of international competitiveness of argentine fishing industry. Chinese Business Review. 10, 481-6.

[18] ALBORNOZ D, MESCHINO G, LIMA L, DAMIANO F, BARILARI A, MASSONE H. (2012). Interacción ingeniería informática-ingeniería ambiental a partir de una aplicación de lógica difusa. I Congreso Argentino de Ingeniería (CADI). Mar del Plata. ISBN 978-987-1312-46-7.

[19] ZELAYA K, LIMA ML, LATERRA P, MACEIRA N, MASSONE H (2009) Simulación de cambios en el uso de la tierra en la cuenca del arroyo Dulce. Provincia de Buenos Aires, Argentina. Simposio de Geomática y otras tecnologías de la Ingeniería Agrícola y el Medio Ambiente. Actas en CD. Cuba

[20] FOSTER S, HIRATA R, GOMES D, D'ELIA M, PARIS M (2002) Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales, Washington D.C., Banco Mundial.