

UTILIDAD DE LAS TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA A LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Mejuto, M.F.; Castaño, S. y Vela A.

mfmjuto@idr-ab.uclm.es

*Sección de Teledetección y S.I.G.. Instituto de Desarrollo Regional.
Universidad de Castilla-La Mancha.Campus Universitario
02071 – Albacete*

RESUMEN: La calidad de las aguas subterráneas en España se halla sometida a importantes amenazas. Para lograr la prevención de situaciones de contaminación es necesario considerar las aguas subterráneas en la planificación del territorio. Por esta razón, se precisa de cartografías de vulnerabilidad y riesgo de contaminación de aguas subterráneas. En España existe muy poco trabajo desarrollado al respecto. En este trabajo se presentan algunas de las técnicas habitualmente utilizadas en la cartografía de la vulnerabilidad y del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, destacando la utilidad de las técnicas de Observación de la Tierra y de los Sistemas de Información Geográfica para este tipo de cartografía. En el caso de contaminación por actividades agrícolas, donde es necesaria la actualización de mapas de usos del suelo e información distribuida espacialmente, las técnicas de Teledetección pueden convertirse en una herramienta insustituible.

PALABRAS CLAVE: vulnerabilidad, riesgo, contaminación, Teledetección, DRASTIC y GOD.

ABSTRACT: The quality of subterranean waters in Spain is threatened by contamination. In order to prevent pollution situations it is necessary to incorporate groundwater to land managing. For this reason, it is needed to have groundwater pollution vulnerability and risk maps. There has been done very little in this field in Spain. In this work, some techniques usually used for groundwater vulnerability and pollution risks mapping are presented, outlining the utility of Earth Observation techniques and Geographic Information Systems for this kind of cartography. Remote Sensing techniques may be an essential tool for risk assessment of pollution due to agricultural activities, because for this purpose updated land uses maps and spatially distributed information are required.

KEYWORDS: vulnerability, risk, pollution, Remote Sensing, DRASTIC y GOD.

INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación de las aguas subterráneas en España están poco estudiados o son completamente desconocidos. Esta falta de estudios contrasta con el hecho de que la calidad de las aguas subterráneas en nuestro país se encuentra amenazada por la contaminación, habiendo sufrido en algunos casos serios impactos (MIMAM 1999).

La propuesta del Plan de Acción de Aguas Subterráneas de la Unión Europea dispone que los Estados miembros deben determinar en qué zonas el agua subterránea es vulnerable a la contaminación, por motivos geológicos, climáticos, tipo de suelo o actividades humanas. También en el artículo 237.3 Reglamento del Dominio Público Hidráulico se establece la necesidad del estudio del riesgo de contaminación de aguas subterráneas para los usos del suelo que puedan afectar a estas. La forma apropiada de reflejar y transmitir esta información son los mapas de vulnerabilidad y riesgo de los acuíferos a la contaminación.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es de extraordinario interés para gestionar esta información. Asimismo, las técnicas de Observación de la Tierra, que permiten obtener información temática de forma rápida y económica, son un complemento esencial para la realización de este tipo de cartografías.

En este trabajo se van a presentar distintas técnicas de realización de estos mapas. El objetivo es acercar el tema de la cartografía de la vulnerabilidad y del riesgo de contaminación a expertos en el área de la Teledetección y de los SIG, de forma que se puedan involucrar en este tipo de estudios. Por ello, se hace especial hincapié en facilitar bibliografía tanto sobre los fundamentos teóricos como sobre ejemplos de aplicación en España.

VULNERABILIDAD Y RIESGO.

El primer problema que presenta la utilización de los mapas de vulnerabilidad es la propia definición del término. Una de las definiciones más

aceptadas y útiles a efectos operativos es la de Vrba y Zaporotec (1994) según la cual “vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del acuífero que refleja la sensibilidad a la alteración de la calidad del agua subterránea originada por el impacto producido por las actividades humanas”. Dentro de este concepto se puede diferenciar (Gómez 1998):

1. Vulnerabilidad intrínseca: función de las características hidrogeológicas del acuífero.
2. Vulnerabilidad específica o integrada: incluye tanto características hidrogeológicas del acuífero como algunos factores de carácter externo (tipo climático, tipo de carga contaminante).

Sin embargo, la inclusión de “factores de carácter externo” contradice la definición dada de vulnerabilidad. Resulta más adecuado restringir el término vulnerabilidad a la denominada intrínseca. En este sentido se manifiesta Varela (1993), recogiendo ideas de Foster, sobre los factores que determinan la vulnerabilidad:

- la inaccesibilidad hidráulica de la zona no saturada a la penetración de los contaminantes
- la capacidad de atenuación de dicha zona como resultado de la retención físico-química o de la reacción de los contaminantes con el terreno.

Para Varela (1993) a estos factores que determinan la vulnerabilidad habría que sumarle los factores climatológicos y los de la carga contaminante, y con esto se obtendría el “riesgo” de contaminación. Esta diferenciación entre los términos vulnerabilidad y riesgo, según se consideren factores intrínsecos o extrínsecos es muy útil y clara.

No obstante, en el presente trabajo se plantea que las condiciones climatológicas deben ser consideradas como un factor intrínseco del acuífero, y, por tanto, estar incluidas dentro del término vulnerabilidad (no así las condiciones del contaminante, que sólo deberán ser consideradas en términos de riesgo). Al hablar de un acuífero no es posible hacer abstracción de las condiciones climáticas, ya que el mismo acuífero situado en una zona desértica o en una muy húmeda tendrá un comportamiento claramente distinto.

CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD

Existen diversas técnicas de valoración de la vulnerabilidad, estando la elección de la técnica en función de las necesidades y de la disponibilidad de los datos en cada caso. Dentro de las metodologías utilizadas pueden establecer dos grandes grupos atendiendo si se realiza o no cuantificación. Los métodos cualitativos asignan categorías de vulnerabilidad (alta, media...) a partir de matrices donde se recogen los datos de cada zona. Los cuantitativos, por el contrario, tratan de obtener valores numéricos que pueden ser traducibles a categorías de vulnerabilidad.

Los métodos cualitativos presentan el gran inconveniente de su subjetividad, lo que los hace muy poco comparables entre zonas. Sólo deberán ser usados para primeras evaluaciones, cuando la escala considerada sea muy pequeña (escalas 1:1.000.000) o cuando los datos disponibles sean muy escasos.

Los métodos cuantitativos están representados básicamente por los paramétricos. En estos se seleccionan los factores que se considera influyen en la vulnerabilidad, y cada factor se discretiza en intervalos. A cada uno de estos intervalos se le da un peso determinado. La combinación final de todos estos pesos asignados (que en cada método se hará de una forma determinada) resulta en unos valores determinados de vulnerabilidad, que luego se agrupan en diferentes clases. Como se deduce la utilización de SIG es de gran utilidad para el desarrollo de este tipo de métodos. La ventaja de estos métodos frente a los anteriores es clara ya que se elimina, al menos en gran medida, la subjetividad de la evaluación y hace muy comparables mapas obtenidos por el mismo método. A continuación se hace una breve descripción de los dos métodos paramétricos más utilizados: DRASTIC (Aller *et al.* 1987) y GOD (Foster 1987).

Modelo DRASTIC

Diseñado para determinar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, considera los siguientes parámetros (uno por cada letra de su nombre):

- **Depth to water:** profundidad del nivel freático.
- **Net Recharge:** recarga que recibe el acuífero.
- **Aquifer media:** litología del acuífero.
- **Soil media:** tipo de suelo.
- **Topography:** mapa de pendientes.
- **Impact of the vadose zone media:** naturaleza de la zona no saturada.
- **Hydraulic Conductivity of the aquifer:** permeabilidad.

Para cada uno de estos parámetros se realizan mapas, que suelen manejarse con SIG. Estos mapas se cruzan dando como resultado un mapa ráster en el que aparecen los diferentes valores de vulnerabilidad por pixel, que pueden ser agrupados o simplemente discriminados por una leyenda con graduación de colores.

Modelo GOD

Reduce el número de parámetros respecto al DRASTIC, con objeto de facilitar su aplicación y de extenderlo a áreas con menos disponibilidad de datos. Los parámetros considerados son:

- **Régimen hidráulico del agua subterránea (Groundwater occurrence):** tipo de acuífero.
- **Naturaleza del acuífero (Overall aquifer class):** litología y grado de consolidación del acuífero.

- Profundidad del agua subterránea (**Depth to groundwater table**): profundidad del nivel freático.

CARTOGRAFÍA DEL RIESGO

A partir de los mapas de vulnerabilidad es posible la realización de mapas de riesgo, incluyendo las características de los contaminantes y sus puntos de acceso al acuífero. Por esto la cartografía del riesgo es más compleja y generalmente debe de ser adaptada a cada caso concreto.

Una de las amenazas más importantes para las aguas subterráneas de España es la contaminación por actividades agrarias. Esta contaminación es de tipo difuso, puesto que su foco son las tierras agrícolas, pero amenaza grandes extensiones. Por ello, es esencial cruzar mapas de vulnerabilidad con mapas de usos del suelo de modo para determinar zonas de riesgo a este tipo de contaminación.

LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA.

En general, para un país como España los parámetros requeridos para los mapas de vulnerabilidad están disponibles (quizá con excepción de la permeabilidad), aunque en muchos casos no con la precisión deseable. Sin embargo, muchos de estos datos necesitan algún pre-tratamiento SIG antes de poder ser empleados.

En caso de no estar disponibles suele resultar extraordinariamente costosa su cartografía por métodos convencionales. La aplicación de técnicas de Observación de la Tierra puede facilitar la obtención de parte de la información necesaria a un costo razonable.

En el caso de los mapas de vulnerabilidad los datos que pueden ser obtenidos a partir de Teledetección son:

1. Recarga neta del acuífero. Esto presenta especial interés para grandes cuencas, cuando hay grandes variabilidades espaciales o en zonas con pocos datos. Para la realización de balances útiles para los mapas de vulnerabilidad es necesario fundamentalmente disponer de datos de evapotranspiración y lluvia, que pueden ser obtenidos a partir de imágenes de satélite por diversas metodologías (FAO 1988; Rosema 1990).
2. Determinación de las condiciones del suelo o de la geología. Estas técnicas son de aplicación más compleja y limitada, siendo en muchos casos de baja fiabilidad. A pesar de ello han sido aplicadas en numerosas ocasiones, en especial en áreas con cubierta vegetal escasa tanto a partir de datos de satélite (Fagbami 1986; Escadafal *et al.* 1989; Reddy y Hilwig 1993) como de sensores aeroportados (Salisbury y D'Aria 1992; Shoshany 1993; Ben-Dor y Ba-

nin 1994). En un país como España, con una buena base de conocimiento geológico, estas técnicas sólo serán utilizadas de forma complementaria a la información ya existente.

La mayor utilidad de las técnicas de Teledetección está en la cartografía de riesgo de contaminación. Esto es así puesto que permite tener mapas de usos del suelo actualizados, especialmente útiles en el caso de la contaminación por actividades agrarias o incluso para contaminación causada por sales o metales pesados.

Los mapas de cultivos obtenidos a partir del tratamiento de imágenes de satélite pueden ser cruzados con mapas de vulnerabilidad mediante SIG, y de esta forma obtener mapas de riesgo. Estos mapas pueden ser obtenidos por distintas metodologías, a partir, por ejemplo, de imágenes Landsat-TM. La utilización de metodologías multitemporales con clasificadores de máxima verosimilitud y criterios de decisión en árbol basados en el desarrollo fenológico de los cultivos (Prados 1995; Martínez-Beltrán 1999; Vela *et al.* 1999) permiten obtener resultados muy precisos y adecuados para la escala habitual de trabajo de los mapas de vulnerabilidad y riesgo (1:50.000 a 1:100.000).

A partir de estos mapas de riesgo, a los que se incorpora la información obtenida de la clasificación de imágenes de satélite, es posible desarrollar políticas de gestión del suelo agrícola y de prácticas agrarias adaptadas a las características hidrogeológicas de cada zona.

Además, estos mapas podrán ser actualizados frecuentemente, algo esencial cuando se trata de analizar la efectividad de las políticas de gestión de explotaciones agrarias.

SITUACIÓN EN ESPAÑA

En España los trabajos existentes sobre cartografía de vulnerabilidad y riesgo son escasos, dispersos y no se les presta demasiada atención por parte de los planificadores. El primer trabajo global fue acometido por el IGME (1976) y se trata de una cartografía 1:1.000.000, una primera aproximación de al tema de la cartografía de la vulnerabilidad. El MOPTMA (1994) presentó las cartografías DRASTIC y GOD para la cuenca del Guadalquivir. Recientemente, se ha presentado la cartografía de la Comunidad Valenciana (EVREN 1998) y de la Comunidad de Madrid 1:200.000 (Navas *et al.* 1998), con la utilización de métodos cualitativos. Se han realizado también experiencias de aplicación del DRASTIC a obras lineales (Martínez *et al.* 1988).

Existe una clara necesidad del desarrollo generalizado de este tipo de mapas para satisfacer las exigencias de la UE y de la propia legislación española. Por tanto en breve plazo deberá acometer-

se una campaña intensiva de este tipo de cartografía, al menos para todas las zonas con recursos subterráneos importantes (bien sea por su cantidad o por su interés estratégico), en la que consideramos que los expertos en SIG y Observación de la Tierra podrán desempeñar un importante papel.

CONCLUSIONES

1. Las técnicas de Observación de la Tierra y los SIG son herramientas muy útiles en la realización de mapas de vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.
2. En particular, para la cartografía del riesgo de contaminación por actividades agrarias, la obtención de mapas de cultivos actualizados tiene una elevada potencialidad.

BIBLIOGRAFÍA

Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J. y Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Environmental Protection Agency – 600/2 – 87 – 035.

Ben-Dor, E. y Banin, A. 1994. Visible and Near-Infrared (0.4-1.1 μm) analysis of Arid and Semiarid Soils. *Remote Sens. Environ.* 48: 261-274.

Escadafal, R.; Girard, M. y Courault, D. 1989. Munsell Soil Color and Soil Reflectance in the Visible Spectral Bands of Landsat MSS and TM Data. *Remote Sens. Environ.* 27: 37-46.

EVREN S.A. 1998. *Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la Comunidad Valenciana*. Universitat Politècnica de València y Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme y Transports, Valencia.

Gómez, M. 1998. *Caracterización de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. Aplicación de los índices DRASTIC y GOD*. Curso sobre Contaminación de Suelos y Aguas Subterráneas, Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

FAO 1988. *Detailed Rainfall Mapping Experiment*. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Netherlands Remote Sensing Board.

Fabgami, A. 1986. Machine processing of Landsat data for soil survey: the Benue Valley savanna case study. *Int. J. Remote Sensing* 7 (10): 1237-1250.

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifers vulnerability, pollution risk and protection strategy. En *Vulnerability of soils to groundwater pollutants*. TNO Committee on Hydrological Research, La Haya, Proceedings and information, nº 38, pp. 69- 86.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) 1976. *Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos*. Escala 1: 1.000.000.

Martínez, M.; Delgado, P. y Fabregat, V. 1998. Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia, 1998. En prensa.

Martínez-Beltrán, C. 1999. *Identificación y estimación de superficies en cultivos herbáceos de regadío mediante imágenes Landsat TM en la Mancha Oriental*. Trabajo de Investigación presentado en la Facultad de Física de la Universitat de València.

MIMAN (Ministerio de Medio Ambiente) 1999. *Libro blanco del agua en España*. Madrid.

MOPTMA (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) 1994. *Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. Cuenca del Guadalquivir*. Inventario de recursos de agua subterránea en España, 2ª Fase.

Navas, E.; García, M.; Vrba, J. y Llamas, M.R. 1998. La vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el plan regional de la comunidad autónoma de Madrid. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia, 1998. En prensa.

Prados, M.J. 1995. *Teledetección y agricultura*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.

Reddy, R.S. y Hilwig, F.W. 1993. Colour additive viewing techniques for small-scale soil mapping in an area of Karimnagar district, Andhra Pradesh, India. *Int. J. Remote Sensing* 14 (9): 1705-1714.

Rosema, A. 1990. Comparison of Meteorological-based rainfall and evapotranspiration mapping in the Sahel region. *Int. J. Remote Sensing* 11(12): 2299-2309.

Salisbury, J.W. y D'Aria, D.M. 1992. Infrared (8-14 μm) Remote sensing of Soil Particle Size. *Remote Sens. Environ.* 45: 15-27.

Shoshany, M. 1993. Roughness-Reflectance Relationship of Bare Desert Terrain: An Empirical Study. *Remote Sens. Environ.* 45: 15-27.

Varela, M. 1993. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas. Las Aguas Subterráneas. Importancia y Perspectivas*. Instituto Tecnológico Geominero de España y real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.

Vrba, J. y Zaporotec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, vol 16, Hannover.

Vela, A.; Calera, A.; Mejuto, M.; Castaño, S. y Ruiz, J.R. 1999. Application of Remote sensing techniques to the evaluation of water consumption. *Europto Series*, Vol. 3499: 58-69.