

Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas de un municipio residencial (Villanueva de la Cañada, Madrid)

P. González García⁽¹⁾, F. López-Vera⁽²⁾, C. Gómez Artola⁽²⁾ y B. Lacalle Pareja⁽¹⁾

(1) Facultad de Farmacia. Universidad San Pablo (C.E.U.)
Urbanización Montepríncipe, Ctra. Boadilla del Monte, km 5,300. 28668 Madrid, España
E-mails: pgongar@ceu.es - belapa@ceu.es

(2) Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Madrid
Ctra. de Colmenar Viejo, km 15,500. 28049 Madrid, España
E-mails: fernando.lopez-vera@uam.es - carmen.gomez@uam.es

RESUMEN

Durante la última década se ha producido un rápido desarrollo urbanístico en la zona Oeste de la Comunidad de Madrid, de manera que muchos de sus municipios han pasado de ser poblaciones agrícolas y/o ganaderas a ser zonas residenciales. Esta transformación presenta implicaciones en la calidad del agua del acuífero sobre el que se asienta, destinada por el Canal de Isabel II (CYII) al abastecimiento de la población. En este trabajo se eligió el término municipal de Villanueva de la Cañada, ubicado sobre el Terciario Detrítico de Madrid, evaluando la vulnerabilidad del mismo por dos métodos: GODS (Foster, 1987) y BGR (The Federal Institute for Geoscience and Natural Resources, 1983). Por otro lado, combinando el método GODS, en el estudio de la vulnerabilidad, con el método POSH (Foster e Hirata, 1988) en la evaluación de la carga contaminante, se establecieron tres zonas de prioridad en un programa de conservación de calidad del acuífero. El municipio ha pasado de ser una zona agrícola de secano a ser un área residencial, donde la mayor parte de la población reside en viviendas unifamiliares, rodeadas de amplias zonas ajardinadas, incrementándose la carga contaminante al acuífero con efectos semejantes al de una zona de agricultura intensiva.

Palabras clave: acuífero, carga contaminante, vulnerabilidad, zona residencial

Evaluation of the groundwater pollution risk in a residential municipality (Villanueva de la Cañada, Madrid)

ABSTRACT

During the last decade, rapid urbanistic development has occurred in the western sector of the Community of Madrid. Many of the towns have changed from agricultural and/or grazing lands to residential areas. This transformation has implications in the quality of the water from the aquifer on which they are situated, as this water has been designated as the water supply of the population by the Canal of Isabel II. In this work, the township of Villanueva de la Cañada, situated on the Detritic Tertiary of Madrid, was chosen. The vulnerability of this township was evaluated by two methods: GODS (Foster, 1987) and BGR (The Federal Institute for Geoscience and Natural Resources, 1983). In addition, by combining the GODS method, for the study of vulnerability, with the POSH method (Foster and Hirata, 1988), for the evaluation of the contaminating load, three priority zones were established in the aquifer quality protection program. The township has changed from a dry farming land to a residential zone, where most of the population live in detached houses surrounded by ample gardens, with a contaminating load of the aquifer similar to that of a high yield agricultural area.

Key words: aquifer, contaminating load, residential zone, vulnerability

Introducción

La importancia de las aguas subterráneas es incuestionable, ya que comprenden alrededor del 95% de los recursos útiles del agua dulce, proporcionando, en la mayoría de los países del mundo, más de la

mitad del agua de abastecimiento humano, y desempeñando un importante papel en el mantenimiento de la humedad del suelo, el caudal de los ríos y las zonas húmedas (Garfias *et al.*, 2002).

La contaminación de las aguas subterráneas se detecta más difícilmente que en las aguas superficia-

les, siendo además, mucho más persistente y difícil de corregir.

Son varias las causas potenciales de deterioro de la calidad de un acuífero, siendo las más importantes las relacionadas con las actividades antrópicas, ya que éstas son generadoras de carga contaminante al subsuelo. Es importante señalar que aquellas actividades, de mayor potencial de generación de contaminantes, están asociadas a la utilización o manejo de compuestos de gran toxicidad (pesticidas, fertilizantes y productos químicos), muy persistentes y de gran movilidad en los acuíferos. Por otro lado, las cargas hidráulicas impuestas como lagunas de irriga-

ción, en el caso de actividades agrícolas, también constituyen un foco importante de contaminación. Un resumen de las actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo viene dado en la Tabla 1.

Por otro lado, el cambio de uso del suelo, como es el caso que nos ocupa en este trabajo, puede poner en peligro la calidad del agua subterránea, aunque este aspecto rara vez es contemplado en los planes de ordenación del territorio.

Las estrategias de protección del agua subterránea, así como la evaluación del peligro de su contaminación (que debe llevarse a cabo previamente) tie-

ACTIVIDAD	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE				
	Categoría de distribución		Principales tipos de contaminantes	Sobrecarga hidráulica	Aplicada debajo de la capa de suelo
(+ indica que aumenta la importancia)					
Desarrollo Urbano					
Saneamiento sin red de alcantarillado	u/r	P-D	n f o t	+	+
Cloacas con fugas (a)	u	P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de aguas residuales (a)	u/r	P	o f n t	++	+
Descarga de aguas residuales en el suelo (a)	u/r	P-D	n s o f t	+	
Aguas residuales en ríos influentes (a)	u/r	P-L	n o f t	++	++
Lixiviación de rellenos/vertederos de basura	u/r	P	o s h t		+
Tanques de almacenamiento de combustible	u/r	P-D	t		
Sumideros de drenaje de las carreteras	u/r	P-D	s t	+	++
Producción Industrial					
Tanques/tuberías con fugas (b)	u	P-D	t h		
Derrames accidentales	u	P-D	t h	+	
Aguas de proceso/lagunas de efluentes	u	P	t o h s	++	+
Descarga de efluentes en el suelo	u	P-D	t o h s	+	
Descargas hacia ríos influentes	u	P-L	t o h s	++	++
Vertederos de residuos con lixiviación	u/r	P	o h s t		
Sumideros de drenaje	u/r	P	t h	++	++
Precipitación aérea de sustancias	u/r	D	s t		
Producción Agrícola (c)					
a) Cultivo del suelo:					
• Con agroquímicos	r	D	n t		
• Y con irrigación	r	D	n t s	+	
• Con lodos/lodos provenientes de agua residual	r	D	n t s o		
• Bajo riego con aguas residuales	r	D	n t o s f	+	
b) Cría de ganado/procesos de cosecha:					
• Lagunas de efluentes	r	P	f o n t	++	+
• Descarga de efluentes en el suelo	r	P-D	n s o f t		
• Descarga hacia ríos influentes	r	P-L	o n f t	++	++
Extracción minera					
Alteración del régimen hidráulico	r/u	P-D	s h		
Descarga de aguas de drenaje	r/u	P-D	h s	++	++
Aguas de procesos/lagunas de lodos	r/u	P	h s	+	+
Vertederos de residuos con lixiviación	r/u	P	s h		

Leyenda: (a): puede incluir componentes industriales; (b): puede ocurrir también en áreas no industriales; (c): la intensificación representa el principal riesgo de contaminación; u/r: urbana/rural; P/L/D: puntual/lineal/difusa; n: compuestos nutrientes; f: patógenos fecales; o: carga orgánica general; s: salinidad; h: metales pesados; t: micro-organismos tóxicos

Tabla 1. Resumen de actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo (Foster e Hirata, 1988)
 Table 1. Summary of activities which could possibly generate a contaminating load in the subsoil (Foster and Hirata, 1988)

nen que ser promovidas por los entes reguladores del agua o del medioambiente (agencias, departamentos, u oficinas nacionales, regionales o locales, encargados de llevar a cabo esta función).

Descripción del área de estudio

La zona de estudio es el término municipal de Villanueva de la Cañada, el cual fue elegido por ser uno de los que ha experimentado un mayor crecimiento demográfico porcentual en los últimos años. Dicho municipio se localiza al Oeste de la Comunidad de Madrid (España), ocupando una superficie de 39,4 Km² (Fig. 1). El terreno forma una amplia planicie, con algunas pequeñas elevaciones como los Cerros del Lobo y de las Vacas, siendo su altura media de 652 m s.n.m.

Villanueva de la Cañada se encuentra situado al pie del complejo ígneo-metamórfico que constituye la Cordillera Central, en el comienzo de la cuenca sedimentaria mesoterciaria del Tajo. Su litología se compone de una serie de arcosas, con cantos de gneis y granitos que en ocasiones puede presentar una abundante matriz arcillosa (López Vera, 1985).

La red de drenaje del término municipal se encuentra integrada en la gran cuenca del Tajo, vertiendo hacia ella a través de dos de sus tributarios: el río Guadarrama y el Alberche.

Según la clasificación de la F.A.O. podemos distinguir cuatro tipos de suelos, cuya extensión en el municipio de Villanueva de la Cañada viene dada en la Tabla 2.

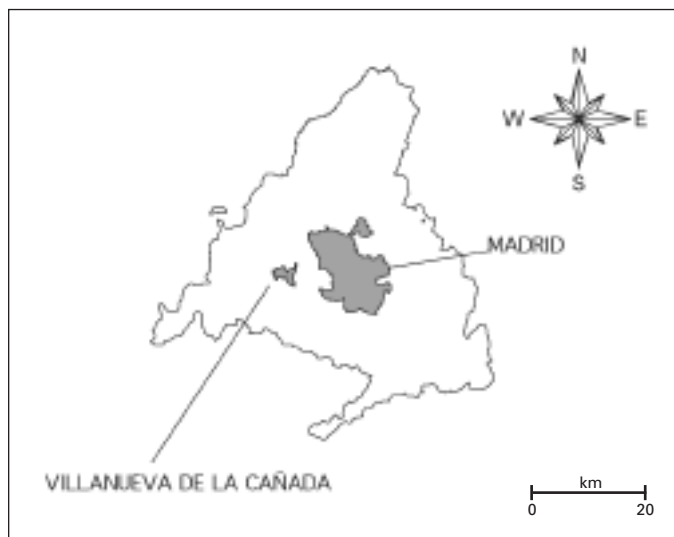


Fig. 1. Esquema de situación del área de estudio
Fig. 1. Scheme of situation of study area

Tipo de suelo	Superficie total (km ²)	% del total
Fluvisol	11,00	27,92
Luvisol	19,38	49,19
Cambisol	3,38	8,58
Regosol	5,64	14,31

Tabla 2. Extensión de los tipos de suelos en Villanueva de la Cañada
Table 2. Extension of the types of soils in Villanueva de la Cañada

Desde el punto de vista de las masas de agua subterránea asociadas a diversos materiales litológicos, el término municipal se asienta sobre el acuífero Terciario Detrítico de Madrid. A nivel general este está formado por un conjunto de lentejones arenarcillosos de pequeño tamaño, distribuidos aleatoriamente en una matriz arcillosa. Esta estructura le da al acuífero, en conjunto, un carácter de único y libre, de gran potencia, heterogéneo y anisótropo, de baja permeabilidad. Sin embargo, a nivel local, la alternancia de niveles arenarcillosos con niveles arcillosos, hacen que se comporte de una forma semejante a la de un acuífero semiconfinado multicapa (López-Vera, 1985).

La recarga de este acuífero se produce bien por medio de agua de lluvia o, en menor proporción, directamente del complejo ígneo-metamórfico. La descarga se realiza a los aluviales o directamente a los ríos.

Uso del suelo en el término municipal de Villanueva de la Cañada

Los asentamientos de población más importantes dentro del término municipal son: el núcleo urbano, en el centro-oeste del término municipal; las urbanizaciones de Cantoblanco, La Raya del Palancar y Guadamonte al sureste del casco urbano; Villafranca del Castillo, al noreste del término municipal y por último Los Brezos y la Mocha Chica al sur del municipio.

Existe una única área industrial al sur del casco urbano, así como una estación de seguimiento espacial en la urbanización de Villafranca del Castillo.

Según datos del censo de población de la Comunidad de Madrid, la evolución de la población desde 1985 hasta los últimos datos publicados de 2004, muestran un incremento entorno al 600%, pasando de los 2.183 habitantes de derecho de 1985 a los 13.198 de 2004, estimándose que para el año 2010, la población sea de 16.859 habitantes.

En el municipio en el año 2001 había censadas 6.037 viviendas, la mayoría de las cuales son unifamiliares (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, 2001).

La superficie cultivada ha descendido de 2.750 ha., en 1972 a 237 ha en 2004 (Ministerio de Agricultura, 2004).

De estas 237 ha cultivadas en 2004, 223 ha fueron de cultivos herbáceos (avena, trigo y cebada, por este orden de importancia) y 14 ha de cultivos leñosos (viñedos). Además se contabilizaron 200 higueras y algunos otros árboles frutales. La superficie forestal es de 784 ha (22,9% de la superficie total del municipio) y hay 41 ha. de prados y pastizales.

La actividad industrial ha crecido en los últimos años, ya que, según datos facilitados por el Ministerio de Industria y Energía, su número se ha incrementado de 20 industrias en 1998 a 83 en el año 2003, sin embargo, su actividad está claramente dirigida a cubrir las necesidades del sector comercio y servicios.

Información más detallada sobre actividades agrícolas e industriales se recogen en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Metodología

El peligro de contaminación del agua subterránea se puede enfocar como resultado de la interacción de dos factores:

- La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, consecuencia de las características naturales de los materiales que lo separan de la superficie.
- La carga contaminante que se aplica, o podrá ser aplicada como resultado de la actividad antrópica.

Si adoptamos este método, podremos tener una elevada vulnerabilidad del acuífero, pero ningún peligro de contaminación, en aquellos casos en los que no exista una carga contaminante significativa al subsuelo y viceversa. Además, la carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero la vulnerabilidad de los acuíferos está determinada fundamentalmente por las características hidrogeológicas naturales (Foster *et al.*, 2002).

En cuanto a la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos, existen diversas metodologías. Mientras unas utilizan un número importante de parámetros, otras están basadas en un número reducido. En la práctica, la utilización de un método u otro queda supeditada fundamentalmente a la disponibilidad de información. Este último factor y el deseo de comparar los dos sistemas más ampliamente utilizados en la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos, ha sido lo que nos llevó a aplicar los métodos BGR y GODS en el estudio de la vulnerabilidad del acuífero.

El método BGR fue desarrollado por The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (1983), con el fin de evaluar la vulnerabilidad de un acuífero frente a la entrada de agua de la recarga de lluvia. En el caso de recargas artificiales sólo permite hacer una estimación.

El método combina, mediante un esquema de puntuación, cuatro factores relevantes que determinan o influyen en la rapidez con la que una determinada sustancia alcanza el acuífero suponiendo una infiltración desde un sector en la superficie o cercano a ella. Dichos factores son:

- a) La capacidad de campo efectiva del suelo (ocupado por organismos vegetales), atravesado por contaminantes.
- b) El valor de la recarga natural al acuífero, dada por la precipitación efectiva, y de la recarga artificial, dada por la infiltración misma.
- c) La litología, es decir el tipo de sedimentos o rocas presentes en la zona no saturada, atravesada por el contaminante.
- d) Y el espesor de la zona no saturada, atravesada por el contaminante antes de alcanzar el acuífero.

El método GOD, propuesto por Foster (1987), estima la vulnerabilidad de un acuífero, multiplicando tres parámetros, a cada uno de los cuales se le asigna un rango de valores (Vrba y Zaporozec, 1994):

- G (groundwater occurrence) – Tipo de acuífero (puntuación de 0 a 1,0).
- O (Overall aquifer class) – Litología de la zona no saturada (puntuación de 0,4 a 1,0).
- D (Depth) – Profundidad del agua subterránea (puntuación de 0,4 a 1,0).

El producto de estos tres componentes arroja un índice de vulnerabilidad que puede variar entre 0 y 1, indicando vulnerabilidad desde despreciable a extrema.

Resultados

Aplicando la metodología antes descrita en el método BGR, los cálculos de la capacidad de campo efectiva los hemos efectuado basándonos en las características texturales y de densidad efectiva de sedimentación (densidad aparente), de los distintos horizontes de los diferentes suelos de la zona (Fluvisoles, Luvisoles, Cambisoles y Regosoles), dadas por el Mapa de Asociaciones de Suelos de la Comunidad de Madrid (1990). Teniendo en cuenta, por último, la influencia de la recarga, obtenemos dos tipos de valores: 93,75 para suelos Luvisoles y Cambisoles y 18,75 para Fluvisoles y Regosoles.

Son valores desfavorables para los suelos arcillosos, ya que, si bien estos suelos permiten un mayor tiempo de residencia del agua que percola, lo que produciría una mayor protección del acuífero, sin embargo, las arcillas frecuentemente presentan grietas de desecación regulares que tienden a acelerar la migración de contaminantes.

La recarga natural se ha determinado por estima, mediante la diferencia entre la precipitación anual media, 435 mm, y la evapotranspiración potencial anual media, 748 mm (datos de la estación termopluviométrica de Brunete, la más próxima a la zona), controlada por el Instituto Nacional de Meteorología.

Estos valores implican una recarga $R = 0,75$ m, siguiendo el método BGR.

No se ha detectado recarga artificial al acuífero.

La potencia de la cobertura litológica se determina desde 1 metro bajo la superficie, hasta el nivel freático. Y para que el cálculo de la vulnerabilidad sea lo más conservador posible, el nivel freático se debe considerar, en caso de que existan datos históricos, como el nivel más cercano a la superficie). Utilizaremos datos del piezómetro PGU-E del Canal de Isabel II, coordenadas $x = 416660$; $y = 4479420$; $z = 604$. Profundidad = 5 m, ubicado en el término de Villanueva de la Cañada.

La descripción litológica es: desde (-1 m) a (-3 m), arena de grano medio con matriz arcillosa; (-3 m) a (-5 m), arena arcillosa.

La potencia de la cobertura litológica se calcula como el producto de la recarga multiplicada por el producto de un factor que caracteriza el material litológico (en nuestro caso arenas arcillosas) y por el espesor de metro en metro hasta el nivel freático.

Sumando la protección del suelo con la de cobertura litológica y entrando en la Tabla 3, nos encontramos con dos zonas, una que corresponde a una efectividad de protección baja concordante con los terrenos de suelos Luvisol y Cambisol, Protección total, $P_t = 513,75$ y otra de muy baja protección que corresponde a las zonas donde aparecen suelos, Fluvisol y Regosol, con $P_t = 292,5$.

Para determinar la vulnerabilidad del acuífero en el municipio de Villanueva de la Cañada, siguiendo el método GOD, el valor asignado al parámetro G se determina teniendo en cuenta que el acuífero subyacente es un acuífero libre (no confinado), pero que actúa como un acuitardo, por lo que no se le asigna un valor máximo, sino uno más conservador de 0,9 (Foster *et al.*, 2002).

En el caso del parámetro O, se han distinguido dos situaciones:

- Gravas aluviales, en los terrenos más próximos a los cauces principales. Asignándosele un valor de 0,8 (Foster *et al.*, 2002).
- Gravas y arenas aluviales y fluvio glaciales, con un valor de 0,7 para el resto del área de estudio (Foster *et al.*, 2002).

Por último, el parámetro D, que ha supuesto tener que distinguir entre las zonas más próximas a cauces permanentes (Río Guadarrama y Río Aulencia), con un nivel freático a una profundidad < 5 m, $D = 0,9$; y el resto del territorio, zonas más alejadas de los cauces con el nivel freático ≈ 5 m, $D = 0,8$.

El factor suelo es un parámetro esencial, no tenido en cuenta en el método GOD, que considera la capacidad de atenuación y el grado de fisuración del suelo. Para la evaluación de este parámetro se consideraron las texturas de los suelos más ampliamente desarrollados en la zona como:

- Textura franco arcillosa arenosa (FAa) con factor del suelo (S) 0,7. Propia de suelos Luvisoles y Cambisoles.
- Textura franco arenosa (Fa) con factor del suelo (S) 0,8. Propia de suelos Fluvisoles y Regosoles.

Si tenemos en cuenta el factor suelo, (GODS), se debe de introducir un nuevo término multiplicativo, 0,8 y 0,7, según la textura. Esto supondrá tener dos zonas diferenciadas:

- La primera con un GODS de $0,9 \times 0,8 \times 0,9 \times 0,8 = 0,52$. Vulnerabilidad alta y que corresponde a los suelos Fluvisoles y Regosoles.

P_t , número total de puntos	Efectividad generalizada de protección	Vulnerabilidad asociada, estimada, del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado en el suelo o subsuelo sobre el acuífero
≥ 4000	Muy alta		> 25 años
2000-3999	Alta	Baja	10-25 años
1000-1999	Moderada	Media	3-10 años
500-999	Baja		Varios meses a 3 años
≤ 499	Muy baja	Alta	Unos pocos días a 1 año

Tabla 3. Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada
Table 3. Kinds of Generalized Effectiveness of Protection and associated Vulnerability

- La segunda con un GODS de $0,9 \times 0,7 \times 0,8 \times 0,7 = 0,35$. Vulnerabilidad moderada, asociada a suelos Cambisol y Luvisol.

Los valores que hemos utilizado para estos cálculos se encuentran en Foster *et al.* (1988), al que remitimos para mayor detalle.

Estas zonas coinciden en el espacio geográfico con los dos tipos de vulnerabilidad que se derivan del método BGR y que se han denominado en ese caso como de vulnerabilidad alta y protección muy baja para el primer tipo, y de vulnerabilidad alta protección baja para el segundo caso (Tabla 3).

El mapa de vulnerabilidad del término municipal de Villanueva de la Cañada, está representado en la figura 2, asociado a la siguiente leyenda:

- Vulnerabilidad moderada: los territorios de vulnerabilidad moderada en el método GODS, que coinciden espacialmente con los denominados de vulnerabilidad alta y protección baja, del método BGR.
- Vulnerabilidad alta: los territorios de vulnerabilidad alta en el método GODS y que coinciden, al igual que en el caso anterior con los de vulnerabilidad alta y protección muy baja del método BGR.

Para poder evaluar la carga contaminante al subsuelo en el término municipal de Villanueva de la Cañada se ha utilizado el Método POSH de Foster e Hirata (1988) y Foster *et al.* (2002). Dichos autores sugieren una clasificación de fuentes potencialmente contaminantes, según el siguiente criterio:

- Origen de la actividad del contaminante (Pollutant Origen).
- Carga hidráulica asociada (Hydráulic Sucharge), inferida por la cantidad de agua utilizada o disponible.

El método POSH tiene en cuenta datos tales como: la localización de la actividad, inicio de la misma, fin de funcionamiento de la actividad (cuando fuera el caso), tipo de actividad, tamaño (definido a través del área ocupada, número de operarios o producción), uso del agua y disponibilidad de la misma.

Para ello se llevó a cabo una recopilación de datos sobre actividades agropecuarias, urbanas e industriales en dicho municipio consultando los censos correspondientes en diferentes Departamentos Ministeriales, Ayuntamiento, así como en la Comunidad Autónoma de Madrid y el Canal de Isabel II.

Según Foster e Hirata (1988), las fuentes de contaminación pueden separarse en difusas y puntuales. Las Tablas 4 y 5 recogen las diferentes fuentes de contaminación recopiladas de los diferentes censos. También hemos seguido el criterio de estos autores a la hora de asignar una potencial carga contaminante al subsuelo según cada tipo de fuente.

Dentro de las fuentes de contaminación difusa sólo destacaremos las aportadas por los viveros, al asemejarse a la incidencia de la agricultura intensiva (en orden al empleo de fertilizantes y fitosanitarios), y las empresas de ganadería intensiva, cría de caballos y perros, que debido a su pequeño tamaño y número reducido de animales serán contempladas como de carga potencial moderada.

En cuanto a la contaminación puntual y siguiendo a Foster e Hirata (1988), sólo destacan las industrias tipo 3, es decir las que por su volumen de vertidos y/o por los productos utilizados en los sistemas de producción, serán consideradas como de elevada carga potencial al subsuelo. El resto de las industrias a medida que decrece el volumen de sus vertidos y/o la peligrosidad de los productos utilizados pasan a ser consideradas de tipo 2 ó 1 y se les asigna una potencial carga contaminante al subsuelo moderada o reducida respectivamente. Siguiendo a estos autores, las rutas de transporte deben ser tratadas como fuentes potenciales de una carga contaminante de intensidad moderada, al poder circular por ellas mercancías de todo tipo, turismos, ganadería, productos agrícolas, hidrocarburos, incluidas las peligrosas, con el consiguiente riesgo de vertido involuntario o por accidente. Aquí las más importantes son la M-600, M-503 y M-521.

Los ríos que drenan el término municipal, el Guadarrama y su principal afluente el Aulencia, se pueden considerar como contaminados, según datos físico-químicos de la Estación de Control de la Confederación Hidrográfica del Tajo de Villalba, (Ministerio de Medio Ambiente 2004): la determinación el ICG (Índice de Calidad General) (M.O.P.U., 1983), y el ISQA (Índice Simplificado de Calidad del Agua) (Cubillo, 1986), arroja valores entre 70-80 en

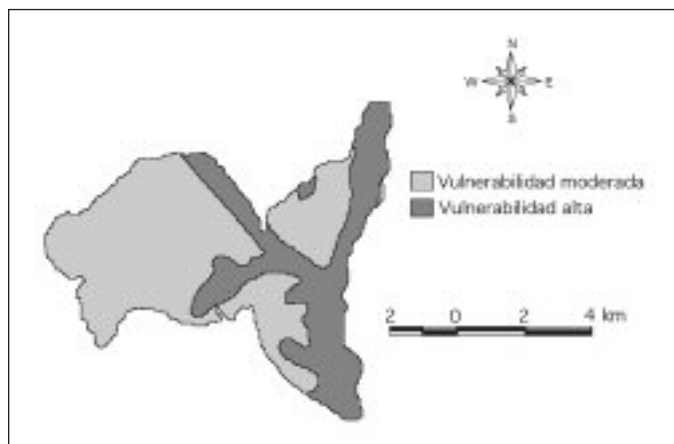


Fig. 2. Mapa de Vulnerabilidad en el municipio de Villanueva de la Cañada, empleando los métodos GODS y BGR
Fig. 2. Map of vulnerability of the township of Villanueva de la Cañada, using the methods GODS and BGR

FUENTES DE CONTAMINACIÓN DIFUSAS	POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO
Saneamiento (Cobertura 95%)	Reducida
Agricultura:	
- Secano: 217,04 ha. cultivadas; 2,33% del área total del municipio	
- Pastos: 33,04 ha. cultivadas; 1,74% del área total del municipio	
- Viñedo-secano: 0,7 ha. cultivadas; 0,35% del área total del municipio	Reducida
- Monte bajo: 4,19 ha. cultivadas; 1,40% del área total del municipio	
- Improductivo: 1,84 ha. cultivadas; 0,92% del área total del municipio	
- 3 Viveros (sistemas de producción agrícola intensivos y modernos)	Elevada
- 1 Cultivos hidropónicos	Reducida
Ganadería:	
- 3 empresas de ganado ovino y caprino (300 cabezas/empresa)	Reducida
- 8 empresas de cría de caballos (10-30 cabezas/empresa)	Moderada
- 2 empresas caninas (50-100 perros/empresa)	Moderada
- 1 granja-escuela (1 pareja por especie de animales domésticos)	Reducida

Tabla 4. Relación de las fuentes de contaminación difusas del municipio de Villanueva de la Cañada (Datos facilitados por el Ayuntamiento del Municipio y por el Catastro de la Riqueza Rústica del Ministerio de Economía y Hacienda)

Table 4. List of the divers sources of contamination of the township of Villanueva de la Cañada (Data facilitated by the Town Council of the Municipality and by the Registry of Rustic Wealth of the Ministry of Economy and Public Finance)

FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUALES	POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO
1 Vertedero de residuos sólidos (vertidos residenciales, industrias tipo 1 y agroindustria)	Reducida
Industria:	
- 1 Carpintería (Industria tipo 1)	Reducida
- 15 almacenes	Sin carga
- 1 Explotación de minerales inertes (gravas)	Moderada
- 2 Hormigones	Moderada
- 7 Talleres mecánicos	Moderada
- 5 Cerrajerías (Industria tipo 3)	Elevada
- 1 Piezas de informática (Industria tipo 3)	Elevada
- 1 Sala de despiece (Industria tipo 3)	Elevada
- 1 Plásticos (Industria tipo 3)	Elevada
- 1 Fábrica textil (Industria tipo 2)	Moderada
1 Laguna de efluentes de origen residencial urbano y mixto urbano-industrial	Reducida
1 Gasolinera	Moderada
3 Cementerios	Reducida
1 Planta de compostaje	Moderada
Fuentes lineares:	
- Carreteras con circulación de mercancías de todo tipo (incluidas peligrosas)	Moderada
- Ríos contaminados, ya que reciben los vertidos de zonas urbanas	Moderada

Tabla 5. Relación de las fuentes de contaminación puntuales del municipio de Villanueva de la Cañada. (Datos facilitados por el Ayuntamiento del municipio)

Table 5. List of specific sources of contamination in the Municipality of Villanueva de la Cañada. (Data facilitated by the Town Council of the municipality)

el primer caso, y entre 60-85 en el segundo caso. Es decir valores intermedios, por lo que le hemos asignado una carga moderada.

Una vez estudiado el peligro de contaminación del acuífero, teniendo en cuenta tanto la vulnerabilidad como la carga contaminante, Foster (1987) y Foster e Hirata (1988) proponen un sistema sencillo para la priorización de actividades, donde el peligro se define como la interacción entre la intensidad de la carga

contaminante antrópica y la vulnerabilidad del acuífero. Se asignará un número, 3, 2 ó 1, según el nivel de prioridad para un programa de protección de calidad de acuíferos (del más bajo al más elevado).

La superposición de las cargas contaminantes por fuentes puntuales y difusas sobre el mapa de vulnerabilidad del término municipal de Villanueva de la Cañada da origen a una nueva representación, (Figura 4), donde quedan reflejadas las zonas de prio-

		VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO		
		BAJA	MODERADA	ELEVADA
CARGA CONTAMINANTE	REDUCIDA	3	3	2
	INTERMEDIA	2	2	1
	ELEVADA	2	1	1
		PRIORIDAD		

Fig. 3. Niveles de prioridades de acción basados en las cartografías de vulnerabilidad de acuíferos y la clasificación de la carga contaminante (Foster e Hirata, 1988; Hirata y Rebouças, 1999)
 Fig. 3. Levels of priorities of action based in the cartography of vulnerability of aquifers and the classification of contaminating load (Foster and Hirata, 1988; Hirata and Rebouças, 1999)

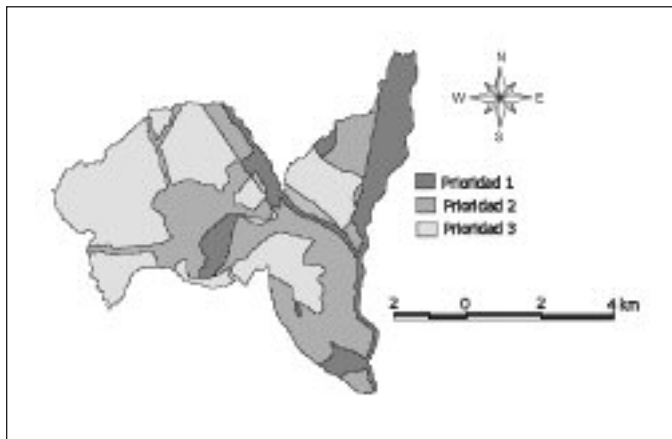


Fig. 4. Mapa de prioridades en un programa de protección de calidad del acuífero con el área asignada a cada prioridad, empleando el método POSH
 Fig 4. Map of priorities in a program of quality protection of the aquifer, with the area assigned to each priority, using the method POSH

rización, siendo esta la expresión gráfica del concepto de Foster e Hirata (1988) sobre las zonas de protección aplicadas a un territorio.

Midiendo las superficies que corresponden a cada acción prioritaria, vemos que para el municipio de Villanueva de la Cañada, los valores son los expresados en la Tabla 6.

Es decir, que más de la mitad del municipio entraría en un programa de protección de calidad del acuífero, al encontrarse por encima de niveles medios,

Priorización	3	2	1
Superficie (Km²)	17,5	13,9	7,9
% del Área del Municipio	44,5	35,4	20,1

Tabla 6. Superficies de los distintos niveles de protección de calidad de acuíferos en el Municipio de Villanueva de la Cañada
 Table 6. Surfaces of different levels of quality protection of aquifers in the township of Villanueva de la Cañada

presentando incluso una quinta parte del territorio valores altos.

Con la situación descrita cabe plantearnos cuál es el futuro y su repercusión en el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

Los sucesivos Planes Generales Municipales de Ordenación Urbana (PGMOU), de 1987, 1998 y 2004, planifican un municipio dedicado a los servicios, de carácter residencial (descripción utilizada por el propio ayuntamiento en Plan General Municipal de Ordenación Urbana de Villanueva de la Cañada, Ayuntamiento de Villanueva de la Cañada, 2004).

Del resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo (Tabla 1), la actividad que puede influir en mayor medida, a la vista del desarrollo previsto es el "cultivo del suelo", es decir las zonas verdes asociadas.

Es difícil establecer un valor sobre las cantidades aportadas, como fertilizantes y fitosanitarios. Se pueden hacer estimaciones basadas en consultas de campo a agricultores, viveros de la zona, cooperativas y particulares.

Los particulares suelen abonar con mantillo o sustrato 1 vez al año, lo que utilizando las cantidades recomendadas, supone 142,8 Kg de abono por 100 m². Esto hace 1,428 Kg/m²/año.

Si comprobamos la composición media de estos abonos: 0,63% de N, 0,45% de P₂O₅ y 0,42% de K₂O, y aplicamos los porcentajes sobre las cantidades, se obtienen unos valores de:

- 90 Kg/ha/año de N.
- 64 Kg/ha/año de P₂O₅.
- 60 Kg/ha/año de K₂O.

Para contrastar la magnitud de estos parámetros, los comparamos con los datos de Garrido *et al.* (1998). La contaminación por actividades agrícolas se cuantifica aquí en zonas de regadío donde según datos de los citados autores, la superficie ocupada por la agricultura de regadío es de 1.383.080 ha., en las que la aplicación de fertilizantes supone un aporte algo superior a las 120.000 ha/año de nitrógeno, 89.200 ha/año de P₂O₅ y 82.400 ha/año de K₂O. Convirtiéndolo a las unidades manejadas en nuestro estudio, tendremos unos aportes por agricultura de regadío en la zona de:

- 86,7 Kg/ha/año de N.
- 64,5 Kg/ha/año de P₂O₅.
- 59,6 Kg/ha/año de K₂O.

Vemos en consecuencia que los valores son del mismo orden de magnitud y prácticamente coincidentes en algunos de los elementos nutritivos.

Deberíamos incrementar estos valores en nuestra zona de estudio con una práctica muy común entre los particulares, el denominado de larga duración. Es decir un preparado en gránulos con una composición media de 15% en N, 5% en P₂O₅ y 8% en K₂O. Este se aplica en cantidad de 3 Kg por 100 m², entre 3 y 4 veces al año. Pero debido a su largo período de permanencia sobre el terreno y la casi total asimilabilidad por parte del césped, principal "cultivo" de estos terrenos, lo podemos considerar, como un aporte despreciable.

Nos encontramos con una situación en la que, por una parte, tenemos una actividad en recesión con cultivos de secano donde los agricultores abonan en magnitud próxima a los 0,10 Kg/m²/año, y por otra parte, un desarrollo representado por particulares y Ayuntamiento, que aportan al terreno cantidades de fertilizantes de alrededor de 1,428 Kg/m²/año.

Para cuantificar la carga de esta última partida en toda el área afectada, deberemos de considerar el tipo urbanístico del municipio (PGMOU 2004): viviendas unifamiliares con parcelas promedio de unos 300 m², en los que hay que descontar la superficie construida, e incrementar esta con las zonas verdes, con las que el ayuntamiento rellena los espacios entre las viviendas y las aceras con zonas de césped y boscosas. Vemos que aproximadamente, según el mapa del término municipal ya mencionado, el 44% de la superficie de la parcelación de las zonas residenciales corresponde a césped o zonas verdes. Cuantitativamente representan unos 3,8 Km². Es decir un 9,64% de territorio del municipio. Pero ¿qué va a ocurrir con las aplicaciones del PGMOU de 1998?

Las características del crecimiento son similares a las trazadas en el PGMOU de 1987: construcción en horizontal (viviendas unifamiliares y bloques de pisos de dos alturas y planta baja) y amplias zonas verdes. Este tipo de desarrollo convierte a Villanueva de la Cañada en uno de los municipios con densidad de vivienda por hectárea más baja de la región madrileña, 13,7.

Este plan de 1998, supone un incremento de 6.800 viviendas de las mismas características, con lo que a su finalización podemos encontrarnos con 6,215 Km² de zonas verdes, un 15,77% de la superficie total.

Recientemente, 31 de mayo de 2004, ha sido presentado por el alcalde de Villanueva de la Cañada el

Avance del nuevo PGMOU, que ya fue remitido a la Comunidad de Madrid tras un período de exposición pública de un mes.

El avance contempla la clasificación de 338 ha más como suelo urbanizable sectorizado, y la construcción de 6893 viviendas nuevas, que se sumarían a las ya mencionadas en los anteriores planes, triplicando las existentes hoy en día.

La única superficie del territorio que quedará al margen, es la que dentro del término municipal corresponde al Parque Regional del curso medio del río Guadarrama (Ley 20/1999, de 3 de mayo, modificada por la Ley 4/2001, de 28 de junio), es decir, 1132 ha, lo que supone un 33,2% de la superficie municipal.

Estas 1132 ha se sitúan a lo largo del cauce del río Guadarrama en terrenos que corresponden a suelos Fluvisoles y Regosoles, que ya hemos visto presentan una vulnerabilidad alta para el acuífero (Figura 2). La carga contaminante procederá de las aguas del río Guadarrama, ya caracterizadas en la Tabla 4 como de carga potencial moderada. Aplicando estas valoraciones sobre la Tabla 3, nos queda definida esta zona como de prioridad 1.

El resto del territorio, después del desarrollo previsto en los PGMOU, queda asemejado en el aspecto que más nos afecta a la carga contaminante, como una explotación agrícola intensiva, lo que representa una carga elevada sobre un territorio con una vulnerabilidad entre moderada y elevada. Aplicando nuevamente el criterio de priorización de Foster e Hirata (1988), implica una priorización 1.

Pasaríamos de una situación en 2005 con unos porcentajes de niveles de protección requeridos para mantener la calidad del acuífero, recogidos en la tabla 7, a un 100% de superficie con nivel de protección 1, según los planes previstos de desarrollo urbanístico. Es decir, un nivel de prioridad alta de un 100%, frente al poco más del 20% de la situación actual.

Discusión

En uno de los municipios de mayor desarrollo urbanístico de los que se asientan sobre el Terciario Detrítico de Madrid, el estudio de la vulnerabilidad por dos de los métodos más comunes, BGR y GODS, pone de manifiesto la vulnerabilidad alta o moderadamente alta de este territorio, vinculada fundamentalmente a la influencia del suelo, a tener que considerar para estos estudios el nivel freático en la posición más alta, y a la propia naturaleza del material geológico.

Hasta ahora con un desarrollo industrial escaso y una agricultura de secano, los aportes de cargas contaminantes eran muy moderados o reducidos.

Pero el desarrollo actual y el previsto en el futuro según los PGMOU, unidos a un desarrollo urbanístico acorde con los gustos actuales, viviendas unifamiliares y amplias zonas verdes, han hecho que una buena parte del territorio se asemeje a una explotación agrícola intensiva.

¿Será dicho crecimiento sostenible con un acuífero vulnerable y dedicado al abastecimiento a la población? La propia dinámica de la recuperación de las aguas subterráneas contaminadas aconseja replantearse estas actuaciones o al menos aconsejar comportamientos que tengan en cuenta de forma prioritaria el uso del agua.

Referencias

- BGR-LÄNDER. 1993. *Concept for the determination of the protective effectiveness of the cover above the groundwater against pollution*.
- Confederación Hidrográfica del Tajo. 2004. *Comisaría de Aguas. Resultados*.
- Cubillo, F. 1986. *Situación actual de la calidad de las aguas en los ríos de la Comunidad de Madrid*. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Comunidad de Madrid.
- Dirección General de Obras Públicas. 1983. *La vigilancia de la contaminación fluvial. Tratamiento de datos de control analítico*. M.O.P.U.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. *TNO. Comm. on Hydro Research. Proceed, an Information* 38:69-86. The Hague.
- Foster, S. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data *WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical manual*, Lima (Perú).
- Foster, S. e Hirata, R. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. *CEPIS/PAHO-WHO. Technical report*. Lima (Perú). 81 pp.
- Foster, S., Hirata, R., Gomez, D., D'Elia, M. y París, M. 2002. *Groundwater Quality Protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies*. The World Bank. Washinton, D.C. U.S.A.
- Garfias, J., Franco, R. y Llanos, H. 2002. Análisis de vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero el curso alto del río Lerma. Estado de México. *II Seminario taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación. Caracterización y evaluación*. Ciudad de La Habana (Cuba).
- Garrido Schneider, E., Azcón González de Aguilar, A., Moreno Merino, L., Navarrete Martínez, P. 1998. Evaluación de la carga contaminante generada por las actividades antrópicas sobre las unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Ebro. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia.
- Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. España. 30/04/05. <http://www.madrid.org/iestadis>
- López-Vera, F. 1985. *Las aguas subterráneas en la Comunidad de Madrid*. Consejería de Obras Públicas y Transporte. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Madrid.
- Ministerio de Agricultura. España. 20/06/04. <http://www.maypa.es/es/agricultura.htm>.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España. 12/03/04. <http://www.mityc.es>.
- Planes Generales Municipales de Ordenación Urbana*, 1987, 1998, 2004. PGMOU.
- Vrba, J. and Zaporozec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologist – International Contributions to Hydrogeology.

Recibido: mayo 2005
Aceptado: enero 2006