

## Estudio de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca

### Vulnerability a the aquifer contamination in Yumbo municipality, Valle del Cauca

Jaime Ernesto Díaz<sup>1</sup>, Claudia Lorena Rivera<sup>2</sup>, y Julián Andrés Figueroa<sup>3</sup>

#### Resumen

El subsuelo de la zona plana del Departamento del Valle del Cauca es un acuífero potencial y en muchos municipios representa la mejor opción de abastecimiento de agua para el abastecimiento humano e industrial. Como consecuencia de usos intensivos en algunas zonas, es necesario conocer en el acuífero los efectos provenientes del movimiento de agentes contaminantes desde la superficie del suelo. Lo anterior representa una amenaza a la calidad del agua subterránea y hace necesario tomar medidas de prevención para evitar la contaminación, debido a los altos costos tanto técnicos como económicos que exigiría la limpieza del mismo. Con el propósito de conocer la vulnerabilidad del acuífero, se realizó una zonificación considerando distintos niveles de vulnerabilidad, en áreas del municipio de Yumbo. Allí, fue estimada la vulnerabilidad a la contaminación utilizando los métodos de índice y superposición GOD y GODS, los cuales permitieron conocer el estado actual del acuífero. La sistematización de la información analizada de los acuíferos en el municipio de Yumbo, indicó que el 30% es de baja vulnerabilidad, el 26% de vulnerabilidad moderada y el 43% de alta; solo el 1% del área de estudio presenta vulnerabilidad extrema. Para la obtención de los planos de vulnerabilidad GOD y GODS se realizaron planos intermedios de nivel freático, se determinó condición del acuífero, se verificó la litología en la zona no saturada y se realizó una zonificación textural del suelo.

**Palabras clave:** Acuífero, contaminación, GOD, GODS, índice y superposición, vulnerabilidad, Yumbo.

#### Abstract

The basement of the flat area of the Valle del Cauca is a potential aquifer in many municipalities and represents the best water for human and industrial supplies. As a result of intensive use in some areas, it is necessary to know the aquifer from the effects of movement of contaminants from the soil surface. These represent a threat to groundwater quality and take necessary preventive measures to avoid contamination, due to the high technical and economic costs that would require cleaning. In order to know the vulnerability of the aquifer, we conducted a zoning considering different levels of vulnerability in Yumbo's area. There, it was estimated the pollution vulnerability using index methods and overlay GOD and GODS, which allowed us to know the current state of the aquifer. The systematization of the information analyzed from aquifers in the town of Yumbo, indicated that 30% is low vulnerability, moderate vulnerability 26% and 43% high, only 1% of the study area has extreme vulnerability. To prepare plans and vulnerability GOD GODS intermediate planes were made of the water table, the aquifer was determined condition, we verified the lithology in the unsaturated zone and conducted a soil textural zoning.

**Key words:** Aquifer, contamination, GOD, GODS, index and overlap, vulnerability, Yumbo.

1 Ph.D. en Ingeniería Agroambiental. Docente Universidad del Valle Cali. Carrera 100 No. 13-00. E-mail: Jaime.diaz@correounivalle.edu.co  
2 Ingeniera Agrícola. Universidad del Valle Cali. Carrera 100 No. 13-00 E-mail: Claudialorena.rivera@hotmail.com  
3 Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle Cali. Carrera 100 No. 13-00 E-mail: juanfiba@hotmail.com

## 1. Introducción

El Valle Geográfico del río Cauca, corresponde a una depresión tectónica formada desde finales del Cretácico, que está limitada por los sistemas de fallas Romeral al oriente y Cauca al occidente. En esta depresión se conformó un espeso relleno de sedimentos provenientes de la mezcla de procesos deposicionales de los ríos que drenan el valle (en especial el río Cauca), con los procesos erosivos de las cordilleras Central y Occidental, que circunscriben la zona. Es una región de gran riqueza hídrica que comprende un área de 3337 km<sup>2</sup> con una precipitación media anual multianual de 1550 mm y una recarga natural anual de 3500 millones de m<sup>3</sup>. CVC (1979). Hasta el momento se han perforado cerca de 1.600 pozos profundos en la parte plana de la región que se encuentran actualmente en operación, con una extracción entre 600 y 800 millones de metros cúbicos de agua al año, utilizada principalmente para regar cultivos de caña de azúcar, el empleo en las industrias y un porcentaje para el abastecimiento de agua potable. (CVC, 1997).

El agua subterránea en el Departamento del Valle del Cauca es un recurso de fundamental importancia en el desarrollo económico de la región y está siendo aprovechado en diversos usos. La extracción de la misma se realiza mediante pozos de los cuales el 53% corresponden a un uso agrícola con un aprovechamiento de 120000 m<sup>3</sup>, el 13% para uso industriales con un caudal de aproximadamente de 10000 m<sup>3</sup> y el restante se encuentra distribuido en abastecimiento público con un caudal de 6000 m<sup>3</sup> (12%). Existen un 20% de pozos abandonados y también se encuentran pozos de estudio los cuales representan un total del 2%. (CVC, 2010).

La corporación autónoma regional del Valle del Cauca, CVC, realizó en el año 1997 un estudio de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Valle del Cauca a escala 1:250.000. El mapa generado ha sido de gran importancia para conocer las áreas de la región donde el acuífero es vulnerable a la contaminación; sin embargo, para dicho estudio no se analizó en su totalidad la información disponible.

Ríos (2007), realizó en la zona sur del Valle del Cauca un análisis para estimar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, el cual generó información básica que facilitó la realización de un plan de manejo de emprendimientos industriales y agrícolas, que preserva las condiciones naturales del embalse subterráneo y asegura la permanencia como fuente de agua potable en la zona estudiada.

La vulnerabilidad a la contaminación es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea; está en función de factores hidrogeológicos que determinan tanto la inaccesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes como la capacidad de atenuación de la misma y de los estratos por encima de ella. «Para estimar en la vulnerabilidad a la contaminación de los sistemas subterráneos se han propuesto diferentes metodologías entre las cuales se pueden mencionar los métodos de índice y superposición, que emplean modelos de proceso basados en la simulación y modelos estadísticos (Lindström, 2005).

Estudiar la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado permite conocer y planificar estrategias de desarrollo en pro de su conservación y uso racional con el fin de mantener las condiciones naturales del embalse subterráneo y asegura la permanencia en el tiempo de calidad y volumen (Páez, 2009).

Según Vrba (1998), la vulnerabilidad de las aguas subterráneas es una propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de la capacidad de ese sistema para resistirse a los impactos humanos y naturales. Por su parte Margat (1968), con el término «vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación» se han dado numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre este, buscando una mejor interpretación espacio – temporal de la misma, Foster y Gomes (1987), Carbonell (1993), Custodio (1995).

De acuerdo a lo reportado por Auge (2004), como hasta el momento no se ha logrado un consenso sobre el alcance del término vulnerabilidad, existen dos grandes tendencias: los que consideran la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.) y los que le otorgan trascendencia al tipo y carga del contaminante.

En la actualidad, se han propuesto diferentes modelos para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Estos son modelos matemáticos que hacen uso de los sistemas de información geográfica (SIG) para generar los mapas de vulnerabilidad y de esta forma, teniendo en cuenta las amenazas posibles, estimar el riesgo de contaminación. Se utilizaron los métodos GOD y GODS, modelos de vulnerabilidad multiplicativos, que toman en

cuenta las variables de profundidad del agua, el substrato litológico en la zona no saturada y el nivel de confinamiento del acuífero.

El método GOD es un modelo de vulnerabilidad multiplicativo, que toma en cuenta las variables de profundidad del agua, substrato litológico y nivel de confinamiento del acuífero. Los valores de las variables van de cero a uno, por lo tanto el índice GOD varía también en este rango.

Algunos investigadores (Foster e Hirata, 1991) proponen incorporar al método GOD un factor relacionado con la capacidad de atenuación del suelo basado solamente en su textura. En términos generales, se considera válido incluir un factor de suelo (S), con excepción de áreas donde la capa de suelo ha sido removida o alterada y en los casos en que la carga contaminante es aplicada debajo de ésta. Al incluir el factor de suelo, se debe considerar el espesor del suelo confinante, la textura y el contenido de materia orgánica, dado que estas propiedades influyen directamente en la desnitrificación in situ y en la atenuación de pesticidas. La metodología así modificada se denomina GODS. Estos métodos son internacionalmente reconocidos y buscan establecer las condiciones en la que se encuentra el embalse subterráneo y ofrecer un grado de vulnerabilidad que permita conocer estado del mismo. Foster e Hirata trabajaron en conjunto con la CVC para ajustar las matrices metodológicas correspondientes a estos métodos, ajustándolas a las características de los parámetros del Valle del Cauca.

En el año 2002, Ingeominas aplicó el método GOD en el departamento de Sucre, para contribuir al conocimiento y aprovechamiento sostenible de las aguas subterráneas de la región.

Yumbo es el municipio industrial de la región con aproximadamente 461 empresas de procesos industriales que generan una alta carga contaminante afectando las fuentes hídricas de la zona incluyendo sus aguas subterráneas, que son vulnerables a la contaminación. (Yumbo, 2000).

Este estudio de 8000 hectáreas se enfocó a la zona plana del municipio de Yumbo, el cual limita al sur con el municipio de Cali y al norte con el municipio de Vijes; en la dirección oeste-este se encuentra entre el pie de monte de la cordillera occidental y el río Cauca.

Este trabajo incluye análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos por medio de dos métodos: GOD (Foster e Hirata, 1988) y GODS (Foster e Hirata, 1991).

## 2. Metodología

Se emplearon los métodos GOD y GODS, evaluando la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos y utilizando el sistema de indexación de parámetros con el apoyo de un sistema de información (Arcgis 9.3) que se muestra en la tabla 1.

Las metodologías GOD y GODS se aplicaron considerando la matriz de Foster e Hirata (1988), modificada por la CVC en 1996, que comprenden las siguientes actividades:

Tabla 1. Descripción del proceso aplicado para la realización de los mapas conceptuales

Información	Actividad	Resultados	Indexación planos
Niveles estáticos pozos y aljibes (2006-2010)	Generación Isobatas	Plano del nivel freático	Arcgis 9.3 Planos de Vulnerabilidad
Fichas técnicas del perfil litológico	Análisis perfil litológico de cada pozo	Plano litológico en la zona no saturada	
	Análisis tipo de acuífero de cada pozo	Plano de condición del acuífero	
Estudio semidetallado de Suelos (IGAC, 1980)	Asociación de la textura del suelo en cada consociación	Plano de zonificación textural	

Se procesó la información de niveles estáticos de los pozos y aljibes, estableciendo para su ubicación rangos de 2 metros.

Se realizó el plano de nivel freático con interpolación lineal a mano alzada.

Se identificaron los rangos de nivel freático de cada pozo según su ubicación en el plano de nivel freático.

Se analizaron los perfiles litológicos de los pozos hasta el nivel freático correspondiente y se estimó la litología en la zona no saturada y la condición del acuífero.

Se realizaron los planos de litología en la zona no saturada y condición del acuífero por medio de interpolación lineal a mano alzada.

Se digitalizaron los planos de nivel freático, litología en zona no saturada y condición del acuífero estableciendo el valor de vulnerabilidad a cada polígono según los valores estimados en las tablas 2, 3 y 4.

Se utilizó el método de superposición de capas para multiplicar los planos obtenidos entre sí y obtener el plano de vulnerabilidad GOD con base en los valores de vulnerabilidad de la tabla 5.

Con base en el plano de orden de suelo del estudio semidetallado de suelos del Valle del Cauca, 1980; se realizó una asociación de cada orden de suelo con su textura y se generó el plano de zonificación textural del suelo, adicionalmente se le determinó el valor de vulnerabilidad correspondiente a cada textura según los valores de la tabla 6.

Se multiplicaron los planos de vulnerabilidad GOD y zonificación textural del suelo para obtener el plano de vulnerabilidad GODS.

Tabla 2. Valores de polígonos en plano de condición de acuíferos

Tipo de Acuífero	Valor
Confinado	0,40
Semiconfinado	0,70
Libre	1,00

Fuente: Foster e Hirata, 1988; CVC 1996.

Tabla 3. Valores de polígonos en plano de litología en zona no saturada

Litología	Valor
Arcilla	0,40
Limos	0,60
Intercalaciones	0,70
Arena	0,80
Gravas	0,90

Fuente: Foster e Hirata, 1988; CVC 1996.

Tabla 4. Valores de polígonos en plano de niveles freáticos

Nivel Freático (m)	Valor
0-2	0,90
2-4	0,966
4-6	0,82
6-8	0,86
8-10	0,70
10-12	0,72
12-15	0,75
>15	0,60

Fuente: Foster e Hirata, 1988; CVC, 1996.

**Tabla 5.** Valores de polígonos en el plano de vulnerabilidad GOD y GODS

Vulnerabilidad	Valor
Deprecible	0,0 - 0,1
Baja	0,1 - 0,3
Moderada	0,3 - 0,5
Alta	0,5 - 0,7
Extrema	0,7 - 1,0

Fuente: Foster e Hirata, 1988; CVC, 1996.

**Tabla 6.** Valores de polígonos en el plano de zonificación textural del suelo. Inscripción en universidades locales, 2005

Textura	Valor
Arcilla no expandible	0,50
Franco arcilloso	0,60
Franco	0,70
Franco arcilloso arenoso	0,70
Franco arenoso	0,80
Arcilla expandible	0,90

Fuente: Foster e Hirata, 1988; CVC, 1996.

Se analizó el comportamiento de los diferentes parámetros de cada plano.

Con el fin de precisar los distintos tipos de acuífero de la zona, se estudiaron las columnas litológicas seleccionando toda la información de los pozos construidos en la zona de estudio. Y se establecieron índices para cuantificar la condición de los acuíferos; los resultados se presentan en la tabla 2.

La información para determinar la litología predominante y condición de acuífero se obtuvo de los archivos del Grupo de Recursos Hídricos de la CVC y de los perfiles litológicos de compañías perforadoras. Con base en el criterio del análisis del perfil litológico por encima del nivel freático, se definió la litología predominante en la zona no saturada. Se dio prioridad a la litología más crítica cuando dos condiciones litológicas se encontraban en la misma proporción. Los índices utilizados en este parámetro varían entre 0.4 y 0.9, y se presentan en la tabla 3.

Para considerar la profundidad del nivel freático (D), el estudio se apoyó en resultados de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), quien anualmente mide el nivel freático de aljibes y pozos. La información de los años 2007-2010, permitió establecer un plano del nivel freático con rangos cada 2 metros. Para determinar los índices correspondientes a la profundidad del nivel freático se utilizaron los criterios definidos por Foster en 1987 y modificados por la CVC en 1996 que varían entre 0.9 para niveles menores que 2.0 m y 0.6 m para niveles mayores a 15 m. Los resultados se presentan en la tabla 4.

La vulnerabilidad por el método GOD se obtuvo multiplicando los índices asignados a cada parámetro (condición de acuífero, litología predominante en la zona no saturada y profundidad del nivel freático), de acuerdo con la siguiente metodología:

Se elaboraron manualmente (las interpolaciones y las isolíneas) los tres planos y luego se digitalizaron. Cada punto en los planos de condición de acuíferos, litología predominante en la zona no saturada y profundidad del nivel freático tiene un valor dado por la metodología; en el Sistema de Información Geográfico se superponen los planos (se multiplican) dando como resultado el plano de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos GOD. Los planos de vulnerabilidad GOD y GODS se realizaron con los rangos establecidos por Foster e Hirata para cada nivel de vulnerabilidad. El valor final de la vulnerabilidad a la contaminación por el método GODS se obtuvo por el producto de los índices de cada uno de los parámetros (tipo de acuífero, litología predominante en zona no saturada, nivel freático y textura). Los rangos de los valores de vulnerabilidad GODS son iguales que los utilizados en el método GOD (Tabla 5).

Para la clasificación textural se trabajó con el Estudio Semidetallado de Suelos del Valle del Cauca, realizado por el IGAC en 1980. Las texturas comunes en la zona de estudio son: arcilla no expandible, franco arcillosa, franco limosa, franca, franco arenosa, arcilla expandible y arena; cabe aclarar que el estudio mencionado no cuenta con información de toda la zona plana del municipio de Yumbo, por ende el plano de vulnerabilidad GODS se realizó solo para el área que cuenta que con la información necesaria. Los valores de las texturas se encuentran en la tabla 6.

### 3. Resultados

El estudio de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en el municipio de Yumbo se realizó a escala 1:25000. Como resultado final del estudio se obtuvieron los planos de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos GOD y GODS y se realizaron planos intermedios de la condición de acuífero, litología predominante en la zona no saturada y profundidad de niveles freáticos.

Para la obtención de todos los mapas se trabajó con la información disponible de los pozos ubicados en la zona de estudio. Con base en el mapa de nivel freático obtenido se encontró que el nivel freático varía entre 0 y 15 metros de profundidad, presentándose los niveles más someros (0-2 m) en las cercanías del río Cauca y van aumentando su profundidad en dirección oriente-occidente hacia la cordillera occidental, salvo el sector de Acopi-Arroyohondo que cuenta con niveles de profundidad que superan los 8 metros.

El método GOD mostró que el 43% del área presenta vulnerabilidad alta, principalmente en los sectores que pertenecen al piedemonte a lo largo del municipio, el 30% corresponde a vulnerabilidad baja en los sectores que corresponden al nororiente y suroriente del municipio a lo largo del río Cauca, el 26% del área se encuentra cartografiada con vulnerabilidad moderada y principalmente se presenta en el centro del municipio y en el suroriente entre el sector de Acopi y el piedemonte paralelo al río Cauca; solo el 1% del área de estudio tiene vulnerabilidad extrema y se encuentra en sitios aleatorios de la zona de estudio.

Con base en la zonificación textural del estudio semidetallado de suelos del departamento del Valle del Cauca, realizado por el IGAC (1980), se determinó la distribución de suelos del municipio, donde se muestra la existencia de suelos arcillosos expandibles y no expandibles; y franco arcillo arenosos principalmente.

El área de estudio con vulnerabilidad GODS obtenida corresponde a un área en el plano de 4372 ha, igual a la encontrada en la zonificación textural. Los resultados indicaron la existencia de vulnerabilidad con el método GODS, pero con un grado de atenuación con respecto al detectado en el método GOD en gran parte del área de estudio, principalmente en las áreas con vulnerabilidades altas y extremas.

Se realizaron mapas intermedios de vulnerabilidad GOD, de zonificación textural del suelo y de vulnerabilidad GODS.

### 4. Conclusiones

El empleo de los métodos indicados demostró ser una herramienta muy valiosa para ser utilizada en la regionalización de cuencas, en este caso de efluentes del río Cauca. Igualmente sirve como cartografía básica para un estudio de riesgos por actividades de vertimiento dependiendo de la composición del contaminante, su movilidad, descomposición, persistencia y cantidad de aplicación y/o para una futura legislación de aguas subterráneas en el Valle del Cauca, en especial en el municipio de Yumbo, importante por ser la zona industrial de la región.

Los resultados obtenidos pueden ser la base para la elaboración de un plan de manejo ambiental, donde se plantee un seguimiento y monitoreo de las aguas subterráneas con base en el plano de vulnerabilidad GOD debido a que este es más riguroso que el plano GODS.

Los mapas de vulnerabilidad GOD y GODS realizados en este trabajo se diferencian de los estudios realizados por la CVC en 1997 a escala 1:250000. El estudio regional hecho por la CVC indica una situación de vulnerabilidad baja y el mapa a escala 1:25000 presenta una situación con vulnerabilidades baja, media y alta

principalmente. Esta situación se presenta debido a que la escala de trabajo del presente estudio requiere de mayor nivel de detalle.

Debido a que el uso del suelo en la zona de estudio es tanto industrial como agrícola, se recomienda evitar derrames, vertimientos o aplicación de fertilizantes sobre el suelo en áreas con vulnerabilidad moderada, alta y extrema (ubicadas a lo largo de la zona de estudio en sentido sur-norte) debido a que dichas vulnerabilidades muestran una situación que requiere atención especial.

En el análisis hidrogeoquímico de los pozos evaluados se presentan valores de algunos elementos (arsénico, cadmio, plomo, etc.) por encima de los valores máximos permitidos, se recomienda que la autoridad ambiental realice un seguimiento que permita identificar la fuente y tomar medidas al respecto.

Es importante realizar una revisión a la legislación vigente donde se establecen los niveles permitidos por la corporación ambiental regional, ya que en el análisis hecho a los resultados de los parámetros fisicoquímicos se evidenció que el níquel, cianuro, nitritos, nitratos y arsénico no se encuentran incluidos en la legislación actual.

## 5. Referencias bibliográficas

1. Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos, Conceptos y Métodos. Universidad de Buenos Aires. CONICET.
2. Carbonell, A. 1993. Groundwater Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. National Research Council National Academy Press. 204 p.
3. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 1979. Estudio Hidrogeológico Regional del Valle del Cauca. CVC. 125 p.
4. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 1996. Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos. CVC. 27 p.
5. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 1997. Estudio de Vulnerabilidad a la Contaminación de las Aguas Subterráneas en el Valle del Cauca a escala 1:250000. CVC. 35 p.
6. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC. 2010. Las Aguas Subterráneas, Importancia y Perspectivas en el Valle del Cauca-Colombia, 8 p.
7. Custodio, E. 1995. Vulnerabilidad de los Acuíferos a la Polución en: Gestión y Protección del Agua Subterránea, Segundo Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Santiago de Chile.
8. Foster, S., y D. C. Gomes. 1987. Groundwater Quality Monitoring: an Appraisal of Practices and Costs. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Perú.
9. Foster, S., y R. Hirata. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Perú.
10. Foster, S., y R. Hirata. 1991. Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas. Una Metodología Basada en Datos Existentes. OPS - CEPIS. Lima. 80 p.
11. IGAC. 1980. Estudio Semidetallado de Suelos en el Valle Geográfico del río Cauca. IGAC. Bogotá. 200 p.
12. Ingeominas. 2002. Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento del Valle. Estudio de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero en el Municipio de Yumbo. Valle del Cauca. 129 p.
13. Linfdröm, R. 2005. Groundwater Vulnerability Assessment Using Process Based Models. Vetenskap Och Kons, KTH, Architecture and the built environment. Estocolmo. 36 p.
14. Margat, J. 1968. Vulnérabilité des Anappes d' eau Souterraines à la Pollution. Bases de la cartographie. BRGM #68. SLG Orléans. 198 p.
15. Municipio de Yumbo. 2000. Plan Básico de Ordenamiento Territorial. Departamento Administrativo de Planeación municipal. Yumbo. 55 p.

16. Páez, O. 2009. Gloria Isabel. Las Aguas subterráneas. Importancia y Perspectivas en el Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Cali. 8 p.
17. Ríos, L. 2007. Vulnerabilidad a la Contaminación, Zona Sur Acuífero del Valle del Cauca, Cali, 105 p. Maestría Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional sede Medellín. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, facultad de Minas.
18. Vrba, J. 1998. Vulnerabilidad, Protección y Gestión de la Calidad de las Aguas Subterráneas. Jornadas sobre la Contaminación de las Aguas Subterráneas: Un Problema Pendiente. Valencia. 48 p.