

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

Orfely María Rueda G & Teresita Betancur V.
Maestría en Ingeniería Ambiental, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental
Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín
eomrg670@udea.edu.co, ptebv787@udea.edu.co

Recibido para evaluación: 17 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 04 de Julio de 2006

RESUMEN

Los mapas de vulnerabilidad de acuíferos constituyen una de las herramientas principales para la toma de decisiones en relación con la protección y manejo del recurso hídrico subterráneo. Para la región del Bajo Cauca Antioqueño, zona en la que el agua subterránea representa casi la única fuente segura de abastecimiento para la comunidad, se aplicaron diez metodologías de evaluación de la vulnerabilidad, seis intrínsecas y cuatro específicas. La validación de las metodologías se hizo mediante la confrontación de resultados con las condiciones de calidad del agua subterránea, de esta manera se estableció que el grupo de metodologías DRASTIC, EKv, AVI y DRASTIC-P reflejan de manera adecuada la susceptibilidad del sistema a ser impactado natural o antrópicamente y que entre ellas el DRASTIC-P sería la de mejor ajuste.

PALABRAS CLAVES: Acuíferos, Vulnerabilidad, Validación, Bajo Cauca (Antioquia, Colombia), Aguas Subterráneas.

ABSTRACT

Groundwater vulnerability maps provide one of the main decision-making tools for groundwater managing and protection. In the Lower Cauca region of Antioquia, where groundwater represents the almost unique and safe source for drinking water supply, diverse vulnerability assessment methodologies (six intrinsic and four specific) were applied. Methodologies validations were done by confronting the results with groundwater quality. We found that the so-called DRASTIC, EKv, AVI and DRASTIC-P methodologies adequately reflect the system susceptibility to natural and/or human anthropogenic impacts and the DRASTIC-P one would exhibit the best fitting.

KEY WORDS: Aquifers, Vulnerability, Validation, Lower Cauca, Antioquia, Colombia, Groundwater.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas por su ubicación en el subsuelo, poseen de manera natural un mayor grado de protección a la contaminación directa que las aguas superficiales; sin embargo, cuando se produce su contaminación, éste es un proceso cuyo efecto resulta difícilmente reversible. De otra parte, y precisamente por su naturaleza “subterránea”, es más difícil acceder al conocimiento de los sistemas acuíferos en aspectos como extensión, variabilidad, geometría, dinámicas, procesos físicos y químicos y demás características hidrogeológicas. Actualmente, se acepta de manera generalizada, que para los planes de gestión de la calidad del recurso hídrico subterráneo, la evaluación de su vulnerabilidad sigue estando al orden del día como medida preventiva y de control de la contaminación.

En la zona del Bajo Cauca Antioqueño, ubicada al norte del departamento de Antioquia, en las últimas estribaciones de la Cordillera Central, el agua subterránea es prácticamente la única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano en la zona rural de los municipios de Caucasia, Tarazá, Cáceres, Zaragoza, El Bagre y Nechí, y se utiliza para abastecer el 60% de la demanda de agua por parte de los 90.000 habitantes de la zona urbana de Caucasia.

Como producto de la realización de una serie de proyectos de exploración hidrogeológica básica (CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia 2003, 2004 y 2005) se ha obtenido un modelo conceptual preliminar del sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño, según el cual en la región, en un área a la fecha explorada de 2.235 km², existen seis unidades hidrogeológicas denominadas U1, U2, U3, U4, U5 y U6; tres de ellas -U2, U3 y U5- poseen el carácter de acuífero (Figura 1). Las unidades hidrogeológicas sedimentarias U2 y U3, de edad cuaternario y terciario, respectivamente tienen bajo grado de consolidación y variación lateral y vertical de facies de arena, grava y algo de arcilla; de forma acoplada, dichas unidades se comportan regionalmente como acuíferos libres, aún cuando localmente U3 estaría semiconfinado por U2. U5 representa un acuífero confinado, asociado al Miembro Inferior de la Formación Cerrito, en lo que parece ser una gran cuenca sinclinal, registrando pequeñas manifestaciones en superficie hacia el norte y el sur de la zona de estudio. Estratigráficamente, por debajo de U5, al norte, existirían antiguas secuencias

de rocas sedimentarias -U6- y al sur se localizaría el basamento del sistema acuífero, U7, formado por rocas metamórficas fisuradas de edad Paleozoica del Complejo Cajamarca.

Los valores de conductividad hidráulica de las unidades acuíferas oscilan entre 0.5 y 5 m/día. Los valores de coeficiente de almacenamiento están dentro de los rangos característicos de acuíferos libres para U2 y U3 y de acuíferos confinados para U5.

Los estudios “Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y parámetros de calidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño”, 2006 y “Una aproximación al entendimiento de la dinámica de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio el Bajo Cauca Antioqueño” (en curso), realizados por Rueda y Betancur, respectivamente, permitieron identificar una serie de metodologías cualitativas de evaluación de la vulnerabilidad aplicables al sistema hidrogeológico libre de Bajo Cauca Antioqueño. Los resultados más relevantes se plantean en este artículo.

2. VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

En hidrogeología, el término “vulnerabilidad de acuíferos” se comenzó a utilizar intuitivamente a partir de la década de los años 70 en Francia por Albinet y Margat, basados en el hecho real de que, en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie. Luego desde los años 80 ha sido ampliamente descrito por Haertle, Aller, Foster e Hirata y se han desarrollado diversas metodologías cualitativas de evaluación y mapeación de la vulnerabilidad. (Foster et al., 2002).

El concepto que definen de manera clara y concisa la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, dado por Vrba y Zaporozec (Baez, 2001), se describe como una propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de su sensibilidad a impactos naturales o antropogénicos.

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso en el cual se combina la valoración de muchas características del sistema acuífero para producir un mapa en el que se diferencian áreas de mayor y menor vulnerabilidad. Varios esquemas se han usado para evaluar y mapear la

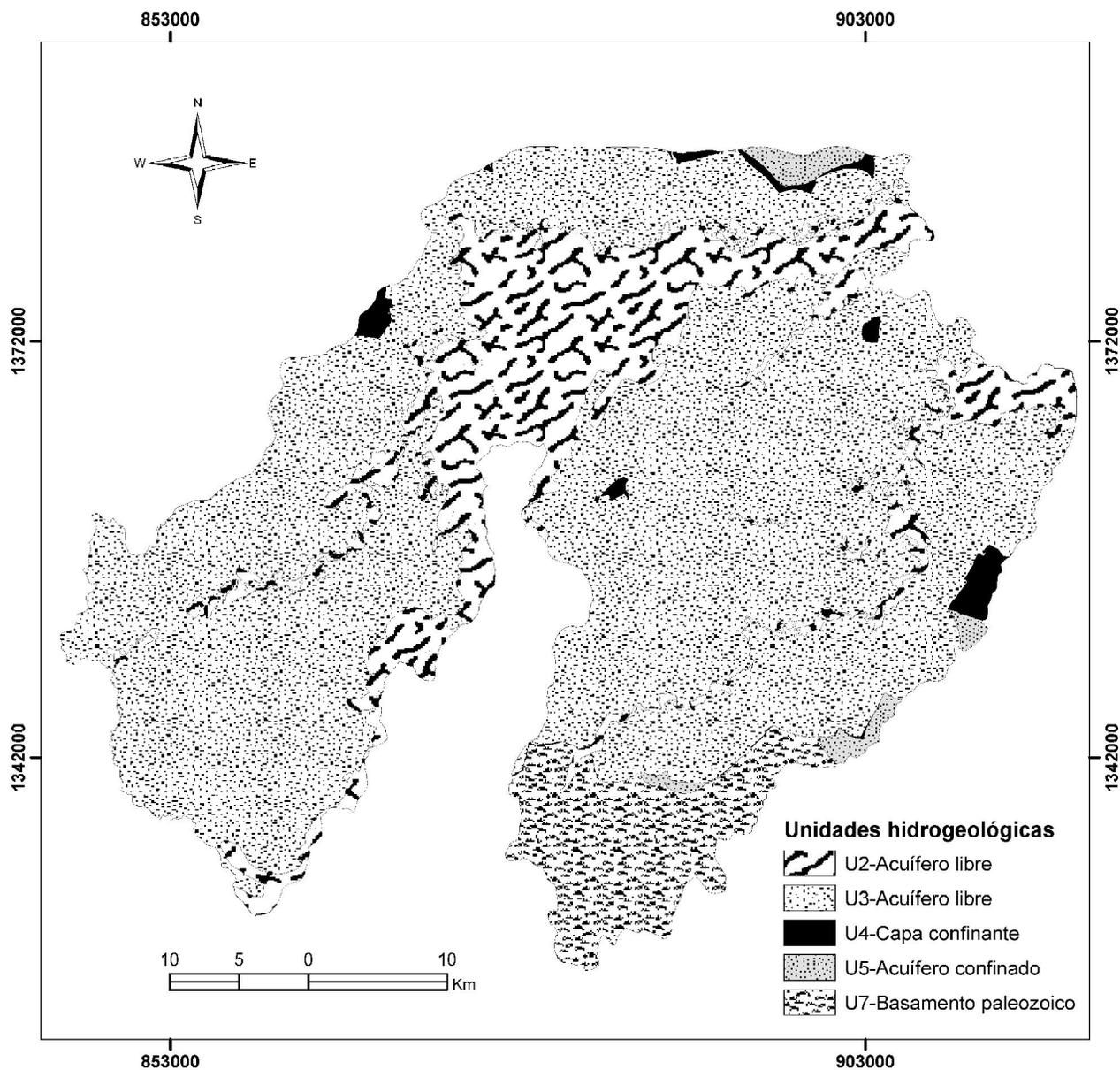


Figura 1. Características de la zona de estudio

vulnerabilidad, los cuales se agrupan en tres tipos fundamentales: De índice y superposición, basados en simulación computacional y los métodos estadísticos.

Los métodos de índice y superposición producen un índice, rango o clase de vulnerabilidad, se basan en la opinión de expertos, lo que les confiere una gran practicidad, pero a la vez un incierto grado de subjetividad. Los del segundo tipo, permiten considerar complejidades físicas y químicas del sistema al centrarse en la evaluación del transporte a través de la zona no saturada, además permiten evaluar la incertidumbre; sin

embargo son poco utilizados debido a que requieren niveles de información que casi nunca esta disponible y los métodos estadísticos que son empleados fundamentalmente para evaluar peligro o riesgo.

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad se utilizan modelos de asignación directa o modelos matemáticos sencillos en los que se combinan procedimientos de sumatoria, productoria o su combinación. Se suman o se multiplican los valores con los cuales se han calificado los diferentes parámetros que intervienen en la metodología por aplicar:

$$I.V = \sum_1^n P_i \quad \text{ó} \quad I.V = \prod_1^n P_i$$

Donde:

$I.V$ = Índice de Vulnerabilidad

P_i = parámetro i

n = numero de parámetros a utilizar

O se pondera asignando pesos, de acuerdo con la importancia que revista cada parámetro.

$$I.V = \sum_1^n R_i P_i \text{ siendo } R_i \text{ el peso del parámetro } i$$

En la evaluación de la vulnerabilidad se tienen en cuenta las características físicas e hidráulicas del sistema acuífero, se habla entonces de la vulnerabilidad intrínseca, o bien se puede considerar la incidencia de sustancias contaminantes generadas por el hombre, en cuyo caso se habla de vulnerabilidad específica. Los parámetros básicos para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca se refieren a los factores que determinan el tiempo de viaje del agua hasta el acuífero, las condiciones de flujo en el medio subterráneo y la capacidad de atenuación del medio. Los métodos intrínsecos más difundidos para estimar la vulnerabilidad son EPPNA, DRASTIC, SINTACS, GOD AVI, EKv, PATHS, BGR y $\Delta hT'$, y los métodos específicos más propagados son DRASTIC-PESTICID, GODS, IPN, IS, EPIK, VULFRAC, SEA-Gindex y SEA-Dindex. Algunos de estos procedimientos pueden aplicarse a cualquier tipo de sistema acuífero, otros son exclusivos para acuíferos costeros, medios kársticos, acuíferos en medios porosos o para acuíferos en medios fracturados. Una descripción completa de estas metodologías y su aplicación puede encontrarse en (Rueda, 2006).

(Foster et al., 2002), con el fin de superar algunas objeciones al uso indiscriminado de índices para evaluar la vulnerabilidad, propone definir de manera clara y concreta cinco clases de vulnerabilidad: Extrema, alta, moderada, baja y despreciable.

- **Vulnerabilidad extrema:** El acuífero es vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
- **Vulnerabilidad alta:** Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son frecuentemente absorbidos o

fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.

- **Vulnerabilidad moderada:** Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
- **Vulnerabilidad baja:** Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo.
- **Vulnerabilidad despreciable:** Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Y la mejor manera de presentar la vulnerabilidad de acuíferos es en forma de mapas, los cuales constituyen una de las herramientas principales para la toma de decisiones en relación con la protección y manejo del recurso hídrico subterráneo; permiten identificar áreas susceptibles a la contaminación, definir la realización de nuevas investigaciones, estructurar redes de monitoreo e impulsar planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.

Una manera de obtener confiabilidad de los mapas de vulnerabilidad de acuíferos consiste en realizar comparaciones de los resultados de varios métodos de evaluación y analizar (validar) sus consistencias o correspondencias en casos prácticos de estudio donde ya ha ocurrido la contaminación (Stigter et al., 2005) o si existen fuentes contaminantes activas sobre zonas de vulnerabilidad alta (Baez, 2001).

Varios ejemplos de comparación y validación de mapas de vulnerabilidad están reportados en la literatura:

- Rupert (1999) sugiere un nuevo enfoque en la aplicación de la metodología DRASTIC mediante la calibración de resultados con información existente acerca de concentraciones de nitratos y nitritos en el agua subterránea, el uso del suelo y la profundidad del nivel freático.
- Baez (2001) valida el mapa de vulnerabilidad para el acuífero del Valle del Río Turbio, Estado de Guanajuato, México con algunos datos de calidad del agua de los pozos como lo son cloruros, conductividad, sólidos disueltos totales y nitratos.
- Lobo y Oliveira (2003) también están de acuerdo, que

además de realizar una comparación entre los resultados cuantitativos (valores de los índices) y valores cualitativos (en términos de alto, medio, bajo) con los análisis de calidad del agua subterránea, también podría ser importante comparar esos resultados con otros obtenidos a partir de la aplicación de diferentes técnicas de investigación como los métodos geofísicos.

- Lobo-Ferreira y Oliveira (2004) aplican seis métodos de índice de vulnerabilidad al acuífero de la península de Setúbal en Portugal y determinan un orden de caracterización de la vulnerabilidad de más baja a más alta por grupos de metodologías.
- Pérez y Pacheco (2004) intentan validar para la provincia de Yucatán, los mapas de vulnerabilidad obtenidos mediante GOD y DRASTIC confrontándolos con los datos de concentración de nitratos, sin embargo la relación entre ellos es casi nula.
- Ribeiro et al., (2004) y Greene et al., (2004) proponen la aplicación de técnicas geoestadísticas para obtener mapas de probabilidad espacial de las concentraciones de nitrato que exceden el valor máximo permisible.
- Greene, et al. (2004) sostienen que el nitrato puede usarse como indicador general de la calidad del agua subterránea y como parámetro de validación de la vulnerabilidad.

Para este trabajo se decidió utilizar la concentración de nitratos y las condiciones de calidad conjugadas en un Índice de Calidad Ambiental -ICA- obtenido mediante la metodología propuesta por la National Sanitation Foundation (NFS) de los Estados Unidos de Norte América en 1970, como instrumentos para la validación de la vulnerabilidad.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño partió de la identificación de las metodologías que tendrían aplicabilidad en la zona, de acuerdo con sus características hidrogeológicas y de la disponibilidad de información. Fue así como se decidió probar los procedimientos intrínsecos de evaluación denominados EPPNA, DRASTIC, SINTACS, GOD, AVI, Ekv y específicos DRASTIC-P, GODS, IPN, IS.

El paso siguiente fue el de identificar la información

disponible por utilizar. El manejo de la información correspondiente a cada uno de los parámetros del medio acuífero, que son considerados en la evaluación de la vulnerabilidad, se hizo de acuerdo con las siguientes especificaciones:

- a. **Profundidad del nivel freático.** Correspondiente a los parámetros “*depth water table*” de DRASTIC, DRASTIC-P, IS; “*depth*” de GOD y GODS; “*soggiacenza*” de SINTACS; espesor de capas homogéneas ubicadas sobre el sistema saturado (**dj**) de AVI; profundidad de la superficie freática de Ekv y profundidad del nivel freático (**P**) de IPN. Este parámetro se obtuvo de acuerdo con los niveles piezométricos registrados en época de invierno, considerando éstos como las condiciones más críticas en términos de vulnerabilidad.
- b. **Recarga.** Correspondiente a los parámetros “*net recharge*” de DRASTIC, DRASTIC-P, IS; “*infiltrazione*” de SINTACS y tasa de percolación o recarga (R) de IPN. Los procedimientos de evaluación de la recarga aplicados en el Bajo Cauca tienen, debido a la calidad de la información hidroclimatológica disponible, un alto grado de incertidumbre, por esta razón el punto de referencia para considerar este parámetro dentro de la evaluación de la vulnerabilidad fue la recarga potencial, la cual registraría valores superiores a 800 mm/año para toda la región.
- c. **Litología del medio acuífero.** Correspondiente a los parámetros tipo litológico de EPPNA; “*aquifer media*” de DRASTIC, DRASTIC-P, IS y “*caratteristiche dell’Acquifero*” de SINTACS. La asignación a las condiciones geológicas presentadas para las unidades hidrogeológicas con potencial acuífera corresponden a depósitos aluviales del Cuaternario, formados por intercalaciones de materiales estratificados de diferente granulometría y a material no consolidado del Miembro Superior de la Formación Cerritos (saprolito areno-arcilloso) de edad Terciario.
- d. **Tipo de suelo.** Correspondiente a los parámetros “*media soil*” de DRASTIC, DRASTIC-P; “*tipologia de la cobertura*” de SINTACS; tipo de suelo de GODS y textura del suelo (S) de IPN. Su calificación se realizó de acuerdo con la composición textural registrada en el mapa de suelos del Departamento de Antioquia (IGAC, 1979) la cual establece la composición granulométrica general y las condiciones de conductividad hidráulica para cada asociación de suelos presente.

- e. **Topografía.** Correspondiente a los parámetros “*topography*” de DRASTIC, DRASTIC-P, IS y a la “*acclività della superficie topografica*” de SINTACS. Las condiciones de pendiente obtenidas a partir de la cartografía básica escala 1:25.000 permitieron calificar el parámetro según los valores asignados por las metodologías.
- f. **Impacto de la zona no saturada.** Correspondiente a los parámetros “*impact of vadose zone*” de DRASTIC, DRASTIC-P; “*effetto depurante del non saturo*” de SINTACS y “*overall aquifer class*” de GOD y GODS. Se tienen en cuenta de nuevo las características de las asociaciones de suelos identificadas en la zona de estudio.
- g. **Conductividad hidráulica.** Correspondiente a los parámetros “*hydraulic conductivity*” de DRASTIC, DRASTIC-P; “*conducibilità idraulica*” de SINTACS; permeabilidad o conductividad hidráulica asociada al suelo (Kj) de AVI y permeabilidad vertical de la zona vadosa (Kv) de EKv. Nuevamente se consideran las características hidráulicas de las asociaciones, además de los valores de conductividad obtenidos a partir de las pruebas de bombeo.
- h. **Ocurrencia del agua subterránea.** Correspondiente al parámetro “*ground water occurrence*” de GOD y GODS. La asignación de su valor equivale al comportamiento hidráulico de un acuífero libre.
- i. **Usos del suelo.** Correspondiente al parámetro “*land use*” (LU) de IS. Las diferentes ocupaciones del territorio identificadas en la zona de estudio permitieron su asignación.
- j. **Fertilización con nitrógeno.** Correspondiente al parámetro (F) de IPN. Se considera la ocurrencia de actividad agrícola en algunos sectores del Bajo Cauca, de acuerdo con la información de usos del suelo.

Toda la información espacial fue dispuesta en una base de datos geográfica y se utilizaron las potencialidades de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica para modelar los diferentes mapas de vulnerabilidad, las operaciones de álgebra de mapas se realizaron utilizando un tamaño de píxel de 100 m x 100 m.

En todos los casos en donde los parámetros presentan diferentes valores de asignación, es decir en los cuales la información tiene un alto nivel de incertidumbre, se aplicaron pruebas de sensibilidad que permitieran determinar el nivel de confianza de los resultados.

Antes de proceder a la comparación de resultados, siguiendo las recomendaciones de Ángel y Mejía (2005), se confrontaron las metodologías utilizadas en términos de los intervalos de calificación y las categorías o índices de vulnerabilidad manejados por ellas, mediante gráficos de relación de linealidad entre los índices de vulnerabilidad, rangos de variación entre índices de vulnerabilidad para cada metodología y evaluación de su comportamiento creciente.

Con el fin de lograr una comparación efectiva entre los resultados de la aplicación de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad fue necesario establecer un criterio de definición y reclasificación de las clases de vulnerabilidad. Se definieron entonces, adaptando lo propuesto por Foster et al., (2002), cinco categorías de vulnerabilidad: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja y se establecieron las condiciones de reclasificación que se presentan en la Tabla 1. En todos los casos se mantuvo el límite máximo del intervalo correspondiente a vulnerabilidad moderada o media como un “pivote” y se establecieron dos categorías superiores y dos categorías inferiores.

Tabla 1. Reclasificación de la vulnerabilidad con el propósito de comparar las metodologías

CLASE	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EKv	DRASTICP	GODS	IPN	IS
MUY BAJA	V1	23-80	21-80	0-0.1	<10	2-3	26-80	0-0.1	24.5-51	7.7-30
BAJA	V2-V3	80-120	80-105	0.1-0.3	10-100	3-5	80-120	0.1-0.3	51-80	30-50
MODERADA	V4-V5	120-160	105-140	0.3-0.5	100-1000	5-7	120-160	0.3-0.5	80-115	50-70
ALTA	V6-V7	160-200	140-210	0.5-0.7	1000-10000	7-9	160-200	0.5-0.7	115-145	70-80
MUY ALTA	V8	200-230	210-260	0.7-1.0	>10000	9-10	200-260	0.7-1.0	145-170	80-100

En adelante, la comparación entre metodologías se realizó mediante operaciones de análisis espacial, a partir de las cuales se sintetizaron los resultados en tablas de doble entrada para establecer un primer criterio en el cual se identificaron las áreas de coincidencia en términos de

vulnerabilidad, entre pares de metodologías y luego se cruzaron los resultados comparando, de nuevo por pares, las categorías de vulnerabilidad para obtener los diferentes comportamientos (Figura 2).

MISMA CLASE	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EKv	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X									
DRASTIC		X								
SINTACS			X							
GOD				X						
AVI					X					
EKv						X				
DRASTIC-P							X			
GODS								X		
IPN									X	
IS										X

(a)

W/Z	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EKv	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X									
DRASTIC		X								
SINTACS			X							
GOD				X						
AVI					X					
EKv						X				
DRASTIC-P							X			
GODS								X		
IPN									X	
IS										X

(b)

Figura 2. Modelo de tablas para comparación de metodologías de vulnerabilidad. (a) Registrará los porcentajes de áreas en las que coincide la evaluación de la vulnerabilidad. (b) Indicará los porcentajes de diferencia en áreas con categorías de vulnerabilidad W en sentido vertical y Z en sentido horizontal

Para la validación de las metodologías se emplearon los mapas de concentración de nitratos e índice de calidad ambiental -ICA-, a los que se les aplicó una categorización en términos de muy bajo, bajo, moderado,

alto y muy alto (Tabla 2) y se procedió al análisis espacial cruzado entre ellos y los mapas de vulnerabilidad, de nuevo una tabla de doble entrada permitió analizar resultados.

Tabla 2. Clasificación de la calidad el agua según nitratos e ICA con el propósito de validar metodologías de vulnerabilidad

CLASE	Nitratos (N-NO ₃ mg/l)	ICA
MUY BAJA	0-4	90-100
BAJA	4-10	70-90
MODERADA	10-30	50-70
ALTA	30-50	25-50
MUY ALTA	>50	0-25

4. RESULTADOS

Después de obtener los mapas de vulnerabilidad para la región del Bajo Cauca Antioqueño calculados mediante la aplicación de las metodologías EPPNA, DRASTIC, SINTACS, GOD, AVI, EKv, DRASTIC-P, GODS, IPN e IS, se realizó la reclasificación de acuerdo con la propuesta planteada en esta investigación. Los resultados se sintetizan en la Tabla 3 y los nuevos mapas de

vulnerabilidad se observan en la Figura 3. Las categorías de mínima de vulnerabilidad, con un 78% del área total en la clase muy baja y llegando apenas al rango medio se registran para GOD y GODS. El grupo de metodologías DRASTIC, DRASTIC-P, AVI y EKv trascienden de manera clara hacia el intervalo medio, mientras que en IPN, IS y SINTACS más del 50% del área total alcanza la clase alta, condición que llega al 100% con EPPNA. IS, en un 14% del área registra sitios con vulnerabilidad muy alta.

Tabla 3. Clases de vulnerabilidad para el Bajo Cauca antioqueño. Se aplican los criterios de reclasificación propuestos en este trabajo

METODOLOGÍAS	VULNERABILIDAD (% DE ÁREA)				
	MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
EPPNA	0	0	0	100	0
DRASTIC	0	16	84	0	0
DARSTIC-P	0	2	81	17	0
SINTACS	0	0	21	79	0
IS	0	0	19	67	14
GOD	78	1	22	0	0
GODS	78	22	0	0	0
IPN	0	2	46	52	0
AVI	0	0	98	2	0
EKv	0	7	79	14	0

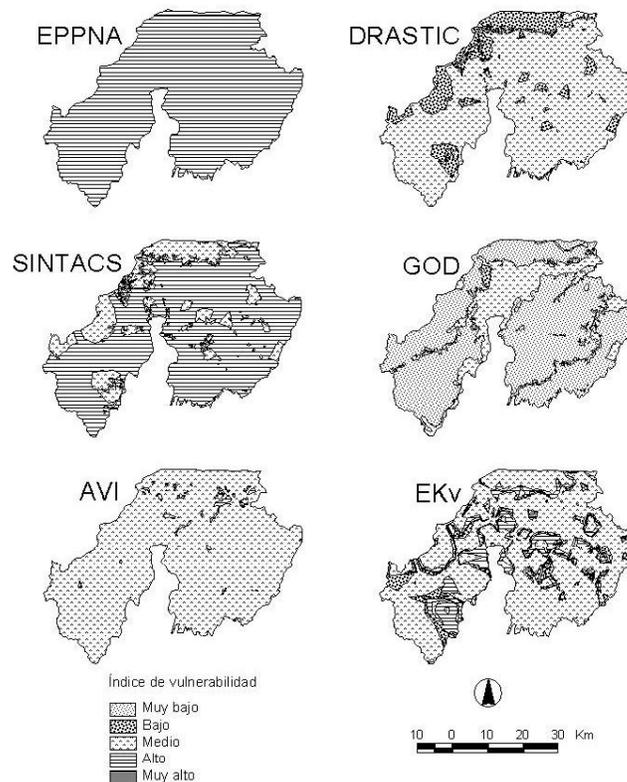


Figura 3. Vulnerabilidad de los acuíferos del Bajo Cauca Antioqueño, según las diez metodologías de evaluación y criterios de reclasificación propuestos en este trabajo

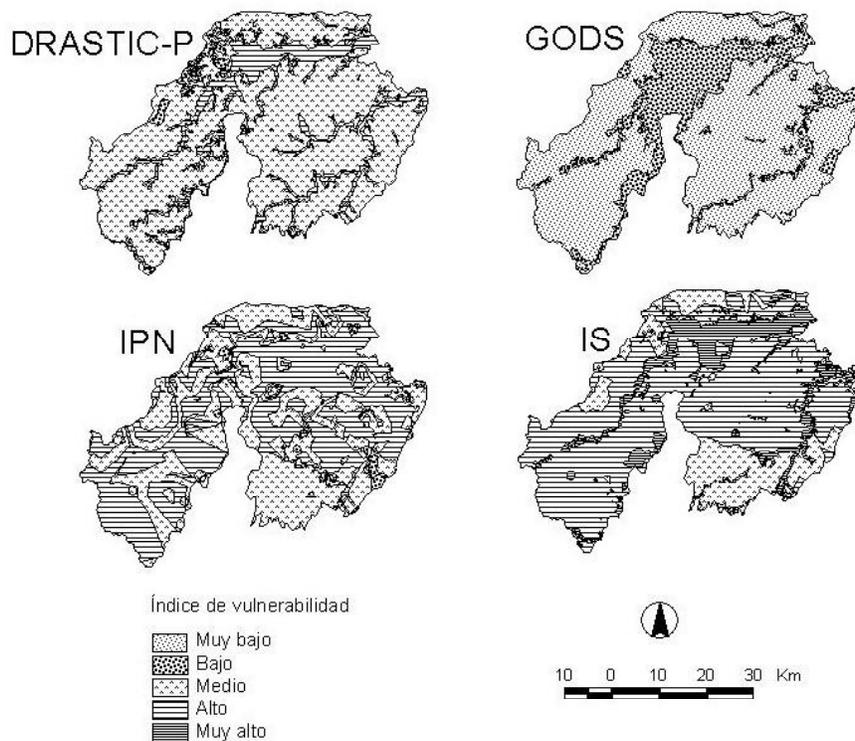


Figura 3. (Continuación) Vulnerabilidad de los acuíferos del Bajo Cauca Antioqueño, según las diez metodologías de evaluación y criterios de reclasificación propuestos en este trabajo

Para evaluar el comportamiento de linealidad y homogeneidad de las metodologías, se elaboraron tres gráficos:

Un gráfico semilog en el que se consideran los valores

mínimo y máximo de los índices de vulnerabilidad para evaluar la relación de linealidad existente. La Figura 4 refleja para la mayoría de los casos, líneas con tendencia creciente y pendientes cercanas. Las tendencias de GOD, GODS, AVI e IPN no son apreciables a tal escala.

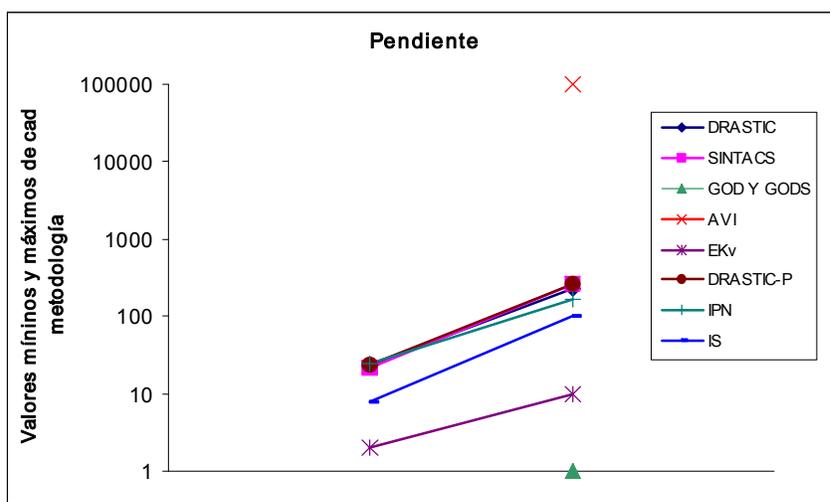


Figura 4. Relación de linealidad entre los índices de vulnerabilidad. (Tomado de Ángel y Mejía, 2005)

Los rangos de variación de las categorías de vulnerabilidad de cada metodología (Figura 5), sugieren una agrupación por clases: DRASTIC, DRASTIC-P e IS manejan en los extremos (para las condiciones de vulnerabilidad mínima y máxima) rangos mayores, y para las categorías intermedias rangos homogéneos. Ekv y AVI exhiben tres y cinco rangos respectivamente y presentan un comportamiento creciente, mayor para AVI. GOD y GODS tienen un comportamiento idéntico, aumentando o teniendo constante la magnitud de cada rango a medida que lo hace la vulnerabilidad. Y

SINTACS difiere de todos los demás.

Finalmente, los gráficos acumulados de índices de vulnerabilidad (Figura 6) son crecientes para todos los casos excepto para AVI dado que expresa la resistencia hidráulica que ofrece el medio para proteger al acuífero y esto inversamente proporcional a la vulnerabilidad del mismo, se registran concavidades hacia arriba para DRASTIC, DRASTIC-P, IS, GOD, GODS y Ekv y curva con inflexiones para SINTACS.

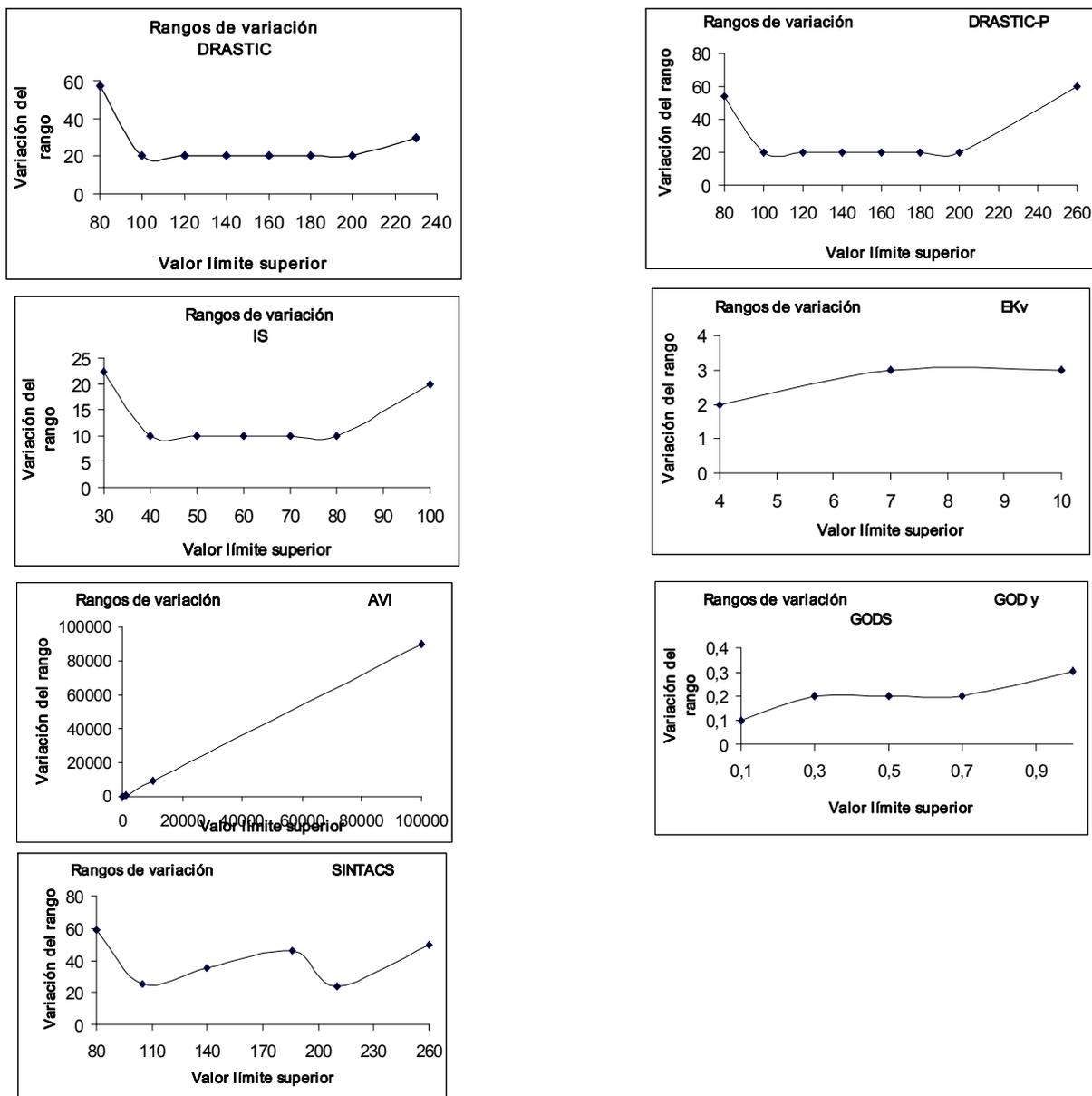


Figura 5. Rangos de variación entre índices de vulnerabilidad para cada metodología (Tomado de Ángel y Mejía, 2005)

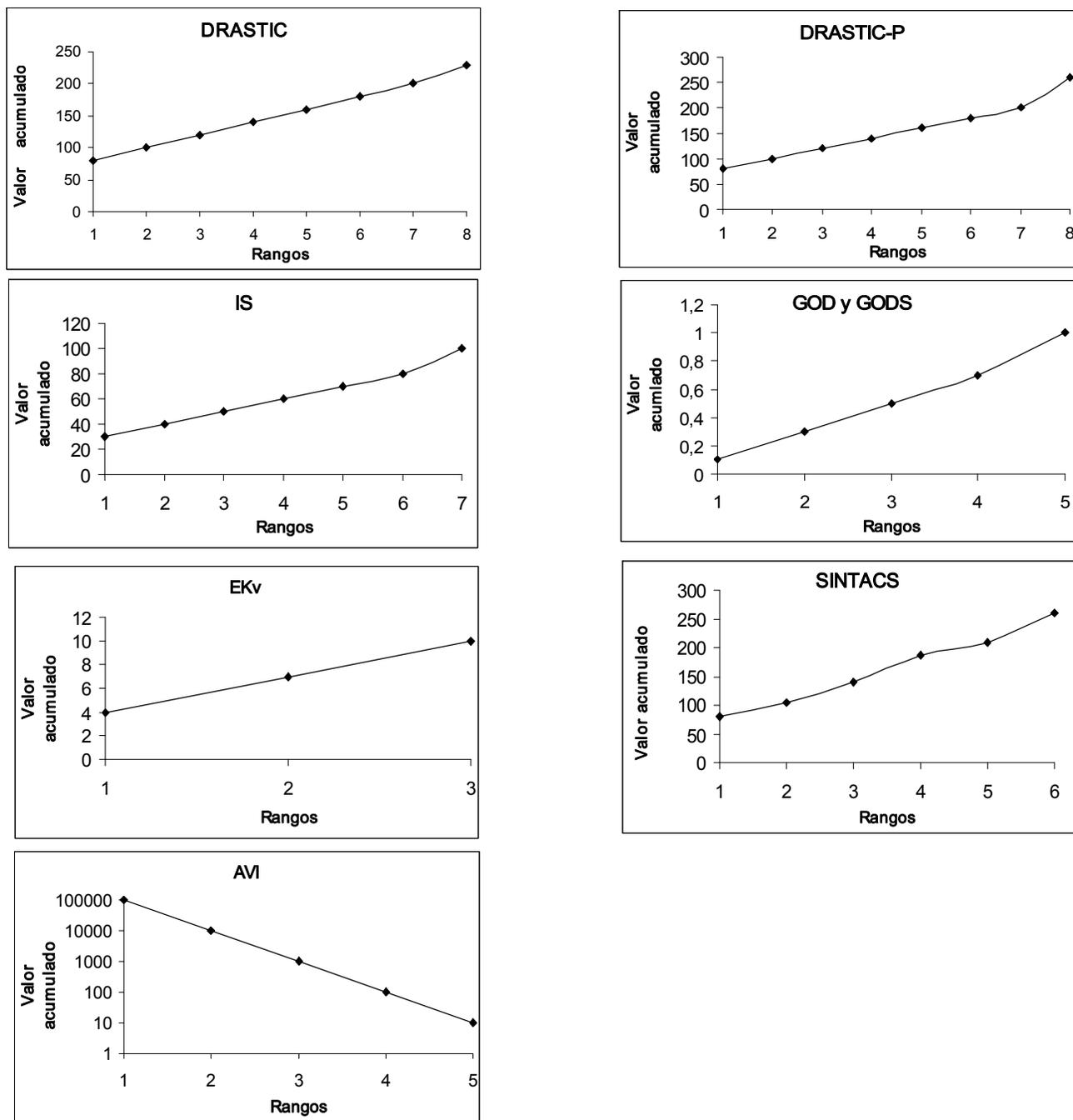


Figura 6. Evaluación del comportamiento creciente. (Tomado de Ángel y Mejía, 2005)

La comparación por pares entre todas las metodologías aplicadas, permitió determinar las áreas de coincidencia y diferencia por rangos de vulnerabilidad como se indica en la Tabla 4, de aquí se logra una mejor visualización y análisis de los resultados.

Los métodos GOD y GODS, difiere ampliamente de los demás, el poder de atenuación dado al suelo disminuye

considerablemente el grado de vulnerabilidad en la metodología GODS y sus resultados son solo cercanos al GOD. La relación más estrecha se presenta entre AVI y DRASTIC, Ekv y DRASTIC-P, ya que las áreas con rangos de vulnerabilidad común están por encima del 75%. Coincidencias menores que la anterior, pero de más del 50%, se registran también entre EPPNA, SINTACS, IS e IPN.

Además las categorías de vulnerabilidad son considerablemente diferentes entre la pareja GOD-GODS (donde el 78% del área total tendría una vulnerabilidad muy baja) y EPPNA (donde esa misma área tendría vulnerabilidad alta). El IS, al calificar el 14 % del área

total con un grado de vulnerabilidad muy alta, registra también considerables diferencias en los resultados con las metodologías que registraron áreas con vulnerabilidad muy baja en particular con GOD y GODS.

Tabla 4. Comparación de las metodologías aplicadas para caracterizar la vulnerabilidad del acuífero libre a la contaminación, en el Bajo Cauca antioqueño, la primera registra el porcentaje de área en que coinciden las clases de vulnerabilidad, las demás indican los porcentajes de diferencia en áreas con categorías de vulnerabilidad (W/Z) W en sentido vertical y Z en sentido horizontal

MISMA CLASE	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	79	0	2	14	17	0	52	67
DRASTIC		X	5	21	82	65	68	2	38	13
SINTACS			X	2	22	24	37	0.3	52	59
GOD				X	21	17	11	78	9	2
AVI					X	78	83	0	46	20
EK _v						X	66	1	33	31
DRASTIC-P							X	1	50	24
GODS								X	1	0
IPN									X	57
IS										X

MB/B	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
GOD	0	14	0	X	0	6	1	0	1	0
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
GODS	0	14	0	0	0	6	1	X	1	0
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

MB/M	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
GOD	0	63	18	X	77	62	70	0	37	17
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
GODS	0	63	18	0	77	62	70	X	37	17
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

Tabla 4. (Continuación). Comparación de las metodologías aplicadas para caracterizar la vulnerabilidad del acuífero libre a la contaminación, en el Bajo Cauca antioqueño

MB/A	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
GOD	78	0	59	X	1	10	7	0	40	58
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
GODS	78	0	59	0	1	10	7	X	40	58
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

MB/MA	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
GOD	0	0	0	X	0	0	0	0	0	2
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
GODS	0	0	0	0	0	0	0	X	0	2
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

B/M	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	16	2	16	14	15	0	8	7
SINTACS	0	0	X	0.3	0.3	0.3	0	0	0.3	0.3
GOD	0	0	0.4	X	1	0.4	0.2	0	0.4	0.4
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	6	1	1	7	X	6	0	6	0.3
DRASTIC-P	0	0	1	0.4	2	1	X	0	1	2
GODS	0	20	2	22	21	17	11	X	9	2
IPN	0	2	3	0.4	2	1	2	0	X	1
IS	0	0.04	0.1	0	0.1	0.1	0.04	0	0.1	X

B/A	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0
GOD	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0.3
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0
GODS	0	0	0	0	0	0	0	X	0	12
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	1
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

Tabla 4. (Continuación) Comparación de las metodologías aplicadas para caracterizar la vulnerabilidad del acuífero libre a la contaminación, en el Bajo Cauca antioqueño

B/MA	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	16	X	0.18	0	0.01	8	0.32	0	10	10
SINTACS	0.3	0	X	0	0	0	0	0	0.01	0
GOD	0.5	0	0.5	X	0.002	0	0	0	0	0.2
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0
EK _v	7	0	6	0	0	X	1	0	0.3	6
DRASTIC-P	2	0	0	0	0	0	X	0	0.1	0.1
GODS	22	0	20	0	1	4	10	X	13	8
IPN	2	0	2	0	0.001	0.5	0.2	0	X	0.2
IS	0.1	0	0.005	0	0	0	0	0	0	X

M/A	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	84	X	79	0	2	12	17	0	44	57
SINTACS	20	0	X	0	0.001	5	0	0	10	14
GOD	22	0	20	X	1	4	10	0	13	8
AVI	98	0	78	0	X	13	16	0	51	66
EK _v	79	0	64	0	1	X	14	0	49	48
DRASTIC-P	81	0	62	0	0.1	12	X	0	41	59
GODS	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0
IPN	46	0	35	0	0.4	10	6	0	X	26
IS	19	0	13	0	0.1	0.4	1	0	1	X

M/MA	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	14
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0.2
GOD	0	0	0	X	0	0	0	0	0	12
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	13
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	13
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	6
GODS	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	2
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

A/MA	EPPNA	DRASTIC	SINTACS	GOD	AVI	EK _v	DRASTIC-P	GODS	IPN	IS
EPPNA	X	0	0	0	0	0	0	0	0	14
DRASTIC	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
SINTACS	0	0	X	0	0	0	0	0	0	14
GOD	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
AVI	0	0	0	0	X	0	0	0	0	1
EK _v	0	0	0	0	0	X	0	0	0	1
DRASTIC-P	0	0	0	0	0	0	X	0	0	9
GODS	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0
IPN	0	0	0	0	0	0	0	0	X	2
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X

La Figura 7 presenta los mapas de distribución de nitratos e ICA. La idea, siempre, de utilizar estos mapas es la de validar la vulnerabilidad, no obstante desde un principio esta validación esta sujeta a la existencia de carga contaminante en la zona y con ella a las características de los cuatro elementos que deben considerarse al evaluarla: clase, intensidad, modo y duración (Foster et al., 2002). Las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas en la región del Bajo Cauca Antioqueño rara vez superan el limite de 10 N-NO₃ mg/l, perspectiva bajo la cual los nitratos validarían las condiciones de vulnerabilidad más suaves, es decir las propuestas por

GOD y GODS (Tabla 5). El Índice de Calidad Ambiental aplicado a los acuíferos de la región involucra para su cálculo los parámetros oxígeno disuelto, temperatura, coliformes, pH, DBO, fosfatos, nitratos, turbiedad y sólidos disueltos totales; se observa que los rangos obtenidos califican la calidad el agua como mala, aceptable o buena (entre baja y alta), condiciones que al ser comparadas con los mapas de vulnerabilidad reportan coincidencias por encima del 50% del área total con las metodologías Ekv, DRASTIC-P, DRASTIC y AVI, las mismas que entre sí registran la relación más estrecha en clases de vulnerabilidad.

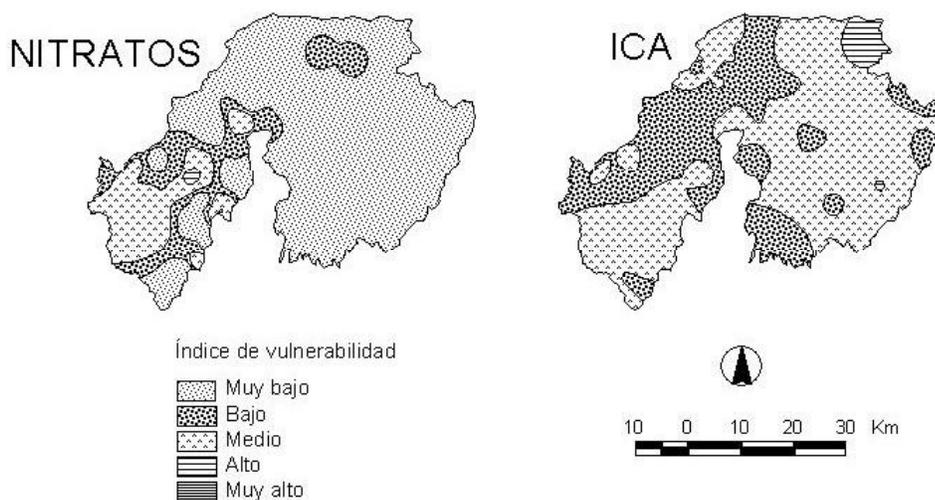


Figura 7. Distribución de la concentración de nitratos e Índice de Calidad Ambiental de los acuíferos del Bajo Cauca Antioqueño.

Tabla 5. Relación entre vulnerabilidad y calidad del agua subterránea en el Bajo Cauca antioqueño, registra el porcentaje de área en que coinciden las clases de vulnerabilidad

METODOLOGÍAS/PARÁMETOS DE CALIDAD	N-NO ₃	ICA
EPPNA	7	3
DRASTIC	15	58
SINTACS	2	15
GOD	61	10
AVI	12	61
Ekv	11	53
DRASTIC-P	11	54
GODS	62	11
IPN	5	30
IS	0.3	13

Todas estas condiciones, sumadas al conocimiento directo que se tiene de la zona de estudio, hacen que las autoras no elaboren una propuesta alternativa o adicional para evaluar la vulnerabilidad. Se considera y concluye que los resultados logrados por el grupo de metodologías DRASTIC, AVI, EKv y DRASTIC-P es adecuado para las características de la zona y que teniendo en cuenta las condiciones rurales de más del 90% del territorio, sin lugar a dudas, el método de vulnerabilidad específica DRASTIC-P es el más apropiado para evaluar el sistema del Bajo Cauca.

Finalmente se pone de manifiesto la necesidad de evaluar el peligro o riesgo y, aunque ese logro va mas allá de los propósitos de este trabajo, una sola mirada (Figura 8) a la relación que existe entre la carga contaminante asociada con la actividad agropecuaria en el oriente y norte de la zona de estudio (Gaviria, 2005) y la vulnerabilidad calculada aquí mediante DRASTIC-P indican que ese ejercicio arrojaría resultados significativos.

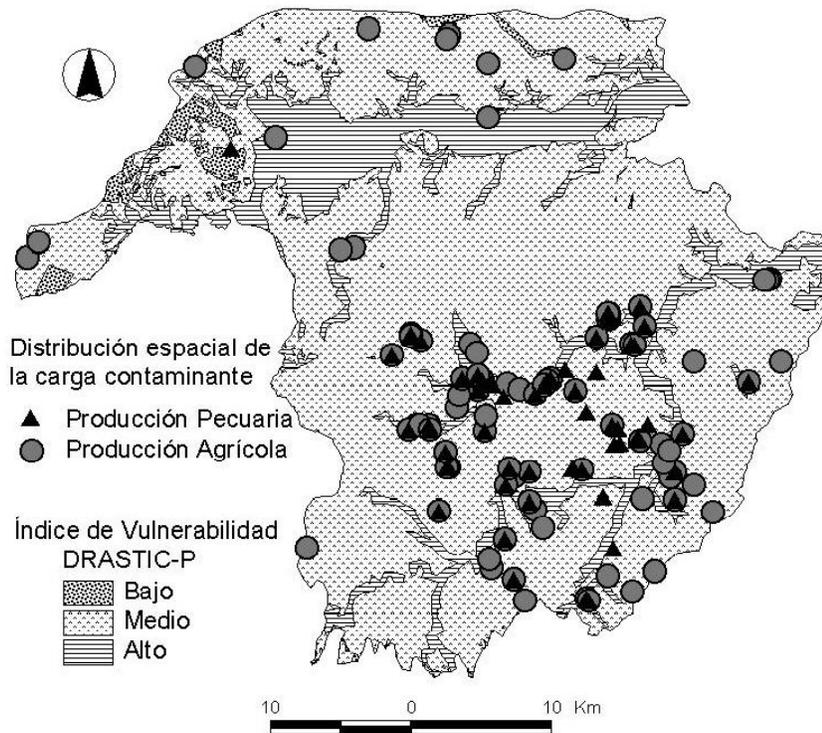


Figura 8. Relación entre condiciones de vulnerabilidad según DRASTIC-P y carga contaminante asociada a actividades agropecuarias en el Bajo Cauca Antioqueño

5. CONCLUSIONES

La evaluación y mapificación de la vulnerabilidad utilizando métodos de índice y superposición, sigue constituyendo una herramienta de gestión del recurso hídrico subterráneo.

Dadas las condiciones hidrogeológicas del sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño su vulnerabilidad se evaluó mediante las metodologías intrínsecas EPPNA, DRASTIC, SINTACS, GOD, AVI, EKv y específicas DRASTIC-P, GODS, IPN, IS. Para la validación de resultados, además de comparar los mapas obtenidos al aplicar y reescalar las categorías de vulnerabilidad, se

confrontaron con la distribución espacial de la concentración de nitratos y del Índice de Calidad Ambiental.

Los resultados revelaron de manera contundente las diferencias en categoría de vulnerabilidad entre diferentes metodologías: La pareja GOD-GODS tiene el 78% del área total con vulnerabilidad muy baja, mientras EPPNA registra en esa misma área tendría vulnerabilidad alta. El IS, al calificar el 14 % del área total con un grado de vulnerabilidad muy alta, registra también considerables diferencias en los resultados con las metodologías que registraron áreas con vulnerabilidad muy baja, en particular con GOD y GODS. La relación más estrecha

se presenta entre AVI y DRASTIC, EKv y DRASTIC-P, ya que las áreas con rangos de vulnerabilidad común están por encima del 75%. Coincidencias menores que la anterior, pero de más del 50%, se registran también entre EPPNA, SINTACS, IS e IPN.

Finalmente se considera y concluye que los resultados logrados por el grupo de metodologías DRASTIC, AVI, EKv y DRASTIC-P es adecuado para las características de la zona y que teniendo en cuenta las condiciones rurales de más del 90% del territorio el método de vulnerabilidad específica DRASTIC-P es el más apropiado para caracterizar el Bajo Cauca Antioqueño.

El paso a seguir es evaluar el peligro o riesgo de contaminación y formular un Plan de Manejo Integral para la Gestión del Recurso Hídrico en el Bajo Cauca Antioqueño.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no podría haberse realizado sin el apoyo de CORANTIOQUIA y de la Universidad de Antioquia. Las autoras también expresamos nuestro más sentido agradecimiento, por sus aportes, a los ingenieros Jorge Ángel R. y Oscar Mejía R.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ángel, J. y Mejía, O., 2005, Comparación entre metodologías de vulnerabilidad. Inédito.
- Baez, A., 2001, Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos. I Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: Metodología. Toluca, México. En red: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html>.
- Betancur, T., en curso, Una aproximación al entendimiento de la dinámica de un sistema acuífero tropical, caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. Tesis doctorado. Universidad de Antioquia, Medellín.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia, 2003, Evaluación hidrogeológica entre los Municipios de Cauca y Cáceres. Informe final. Medellín.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia, 2004, Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al Norte del Municipio de Cauca. Informe final. Medellín.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia, 2005, Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad en la Cuenca del Río Caserí. Informe final. Medellín.
- Foster, S. et al., 2002, Groundwater Quality Protection. A guide for water utilities, municipal authorities, and environmental agencies. The World Bank. Washington, D.C.
- Gaviria, J., 2005. Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del bajo cauca antioqueño. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Greene, E. et al., 2004, Ground-Water Vulnerability to Nitrate Contamination in the Mid-Atlantic Region. USGS Fact Sheet FS 2004-3067. En red: <http://md.water.usgs.gov/publications/fs-2004-3067/html/>.
- Lobo-Ferreira, J.P. y Oliveira, M., 2004. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. Geofísica Internacional, Vol. 43, Num. 4, pp. 541-550. En red: www.dha.lnec.pt/nas/pdf/Lobo2004.pdf.
- National Sanitation Foundation Water Quality Index. En red: http://bcn.boulder.co.us/basin/watershed/wqi_nsf.html.
- Pérez, R. y Pacheco, J., 2004, Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Artículo de Investigación. Ingeniería 8-1, pp. 33-44. En red: <http://www.uady.mx/sitios/ingenier/revista/volumen8/vulnerabilidad.pdf>.
- Ribeiro, L. et al., 2004, CHAPTER 7. Influence of irrigation on groundwater nitrate concentrations in areas considered to have low vulnerability to contamination. Usunoff-07, pp. 67-84.
- Rueda, O., 2006, Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y parámetros de calidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño. Proyecto de Maestría. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Rupert, M.G., 1999, Improvements to the DRASTIC groundwater vulnerability mapping method. National Water-Quality Assessment Program – NAWQA. USGS Fact Sheet FS-066-99. U.S. En red: <http://id.water.usgs.gov/PDF/factsheet/DRASTIC.pdf>.
- Stigter, T. et al., 2005, Evaluation of an intrinsic and

a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal Official*. 10.1007/s10040-004-0396-3. Springer-Verlag.