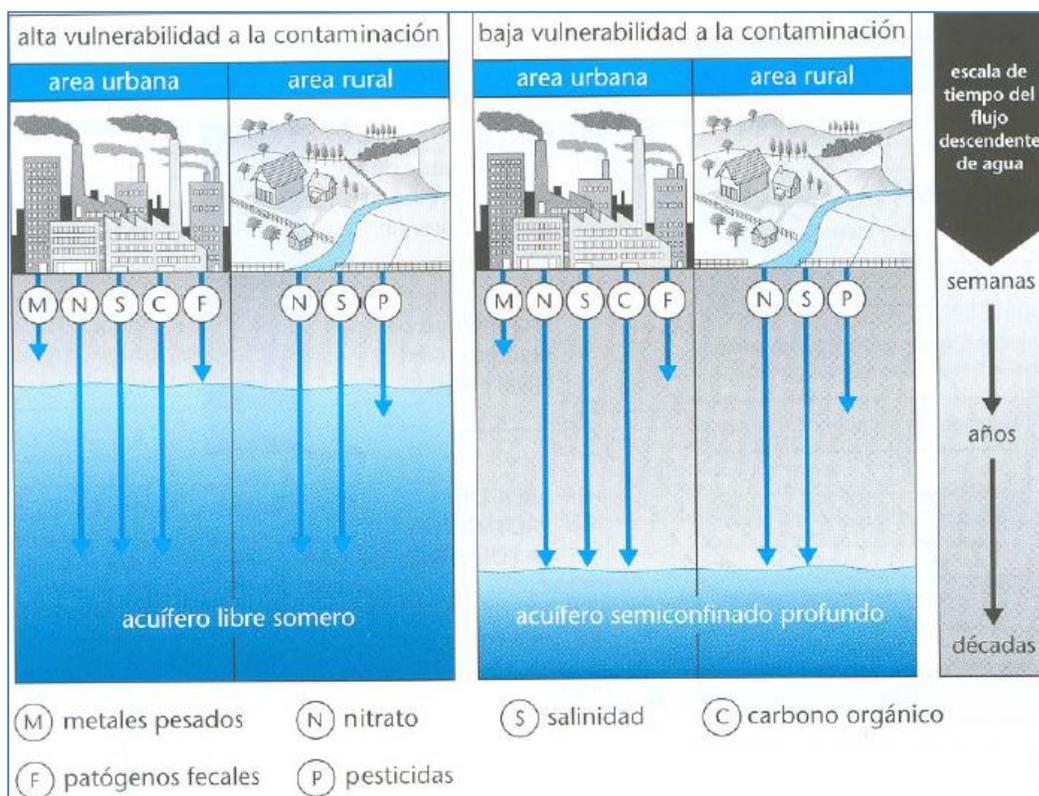


MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL  
VICEMINISTERIO DE AMBIENTE  
GRUPO DE RECURSO HÍDRICO



PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRINSECA DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN



Elaborado por:

**MARÍA CONSUELO VARGAS QUINTERO**

Contrato No. 1021

**OSCAR DARIO TOSSE**

Supervisor

Bogotá, Septiembre de 2010

TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
Marco legal .....	6
Enfoque .....	7
Definiciones .....	8
<b>1. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>10</b>
1.1. Capacidad de atenuación de la carga contaminante .....	10
1.1.1. <i>Suelo</i> .....	10
1.1.2. <i>Zona no saturada</i> .....	10
1.2. Resistencia o Inaccesibilidad en sentido hidráulico .....	11
1.2.1. <i>Régimen hidráulico del acuífero</i> .....	11
1.2.2. <i>Profundidad del agua subterránea</i> .....	11
1.2.3. <i>Características litológicas</i> .....	11
1.3. Transporte de Contaminantes .....	12
1.3.1. <i>Topografía</i> .....	12
1.3.2. <i>Recarga neta</i> .....	12
<b>2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRINSECA</b> .....	<b>13</b>
2.1. Métodos de Evaluación .....	13
2.2. Métodos paramétricos .....	15
2.2.1. <i>Método GOD</i> .....	15
2.2.2. <i>Método DRASTIC</i> .....	19
2.2.3. <i>Método SINTACS</i> .....	22
2.2.4. <i>Método EPIK</i> .....	26
2.2.5. <i>Evaluación de la Vulnerabilidad a la Intrusión Marina. Método GALDIT</i> .....	27
2.3. El Método a Elegir .....	29
<b>3. MAPAS DE VULNERABILIDAD</b> .....	<b>31</b>
3.1. Leyenda del Mapa de Vulnerabilidad .....	32
3.1.1. <i>Utilidad y limitaciones de los mapas de Vulnerabilidad</i> .....	32
3.2. Experiencias en el país en evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación .....	35
3.2.1. <i>Mapas a Escala regional</i> .....	35
3.2.2. <i>Mapas de Vulnerabilidad a escala semidetallada</i> .....	36



**4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 43**  
**BIBLIOGRAFIA ..... 44**





## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de mapas según su nivel de evaluación. ....	8
Tabla 2. Definiciones de Vulnerabilidad.....	9
Tabla 3. Definición Práctica de las clases de vulnerabilidad. ....	14
Tabla 4. Métodos paramétricos para determinar la vulnerabilidad intrínseca.....	16
Tabla 5. Categorías de vulnerabilidad para el método GOD. ....	17
Tabla 6. Valoración de parámetros para el método DRASTIC. ....	20
Tabla 7. Factores de ponderación para el método DRASTIC.....	22
Tabla 8. Grados de Vulnerabilidad –Método DRASTIC.....	22
Tabla 9. Puntuación de las variables para el método SINTACS.....	23
Tabla 10. Factores de Ponderación –método SINTACS. ....	25
Tabla 11. Evaluación de la Vulnerabilidad –método SINTACS. ....	26
Tabla 12. Descripción y valoración de variables –método EPIK.....	26
Tabla 13. Grados e índices de Vulnerabilidad del acuífero kárstico –método EPIK.....	27
Tabla 14. Variables de evaluación del Método GALDIT. ....	28
Tabla 15. Clasificación de la Vulnerabilidad –método GALDIT. ....	29
Tabla 16. Vulnerabilidad del acuífero y actividades potencialmente contaminantes. ....	37



## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Interrelación entre la densidad de los puntos de información, el número de datos por punto y la escala de evaluación.....	14
Figura 2. Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca <sup>(10)</sup> .....	17
Figura 3. Interpretación de la vulnerabilidad de los acuíferos semi-confinados a la contaminación <sup>(10)</sup> . Método GOD.	18
Figura 4. Variables de evaluación del método DRASTIC.....	19
Figura 5. Equilibrio agua dulce –agua salada <sup>(11)</sup> .....	27
Figura 6. Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación <sup>(11)</sup> .....	28
Figura 7. Mapa de Vulnerabilidad -método GOD <sup>(10)</sup> .....	31
Figura 8. Leyenda de Vulnerabilidad <sup>(13)</sup> .....	32
Figura 9. Prohibiciones o Restricciones de actividades según grado de Vulnerabilidad del acuífero.....	33
Figura 10. Comparación de los métodos de evaluación de Vulnerabilidad para acuíferos <sup>(14)</sup> .....	34
Figura 11. Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca de Sucre.....	35
Figura 12. Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Aluvial del Valle del Cauca.....	36
Figura 13. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice DRASTIC.....	38
Figura 14. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice GOD.....	38
Figura 15. Vulnerabilidad Método DRASTIC & DRASTIC-P.....	40
Figura 16. Vulnerabilidad Método SINTACS.    Figura 17. Vulnerabilidad Método GOD.....	41
Figura 18. Distribución de la concentración de Nitratos e Índice de Calidad.....	41
Figura 19. Mapa de Vulnerabilidad a los agroquímicos por el Método DRASTIC.....	42



## INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan las definiciones de los principales conceptos relacionados con la vulnerabilidad de los acuíferos y las metodologías empleadas para su evaluación y sus limitaciones. La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es un tema actual en la gestión del recurso hídrico y su evaluación tiene como objetivo la protección del agua subterránea: prevención de la contaminación y el mantenimiento de la calidad del agua subterránea no contaminada.

No obstante, a pesar de las casi tres décadas de utilización y aplicación del término vulnerabilidad no existe una definición ampliamente reconocida o aceptada. La Asociación Internacional de Hidrogeólogos –AIH<sup>(1)</sup>, por su parte, emplea y recomienda el empleo del término vulnerabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema hidrogeológico que depende de la sensibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano. Cabe resaltar que la caracterización de la vulnerabilidad es una aproximación cualitativa y no cuantitativa, es decir que tiene un componente subjetivo que afecta el resultado final. Por tanto, dependiendo del método que se utilice, los resultados para un mismo acuífero pueden ser diferentes y su validez es relativa. Así mismo, la selección del método a usar depende de la cantidad, calidad y disponibilidad de información. En Colombia, la escogencia de la metodología es limitada debido a la escasez de información hidrogeológica.

Existen cuatro grupos de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, así: (1) los métodos de simulación, (2) los métodos estadísticos, (3) los métodos de índices y de superposición y (4) el método de ambientes hidrogeológicos. Este documento se enfoca en los métodos de índice: DRASTIC, GOD, SINTACS, EPI y GALDIT, dado su amplio reconocimiento y utilización. La mayoría de estos métodos evalúan la vulnerabilidad a una carga contaminante puesta en superficie (flujos verticales descendentes), a excepción del GALDIT que evalúa la vulnerabilidad de un acuífero a la intrusión salina (flujo principalmente lateral).

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación generalmente se clasifica desde baja, media, alta, muy alta, hasta extrema. Los resultados de esta evaluación se suelen presentar en mapas temáticos, los cuales zonifican un territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito específico, es decir mapas orientados a usos u objetivos concretos. Estos resultados deben ser articulados con los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA y los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, para así garantizar la protección de los sistemas acuíferos.

Por último, se hará referencia a la *vulnerabilidad o intrínseca (natural)* de un acuífero a la contaminación cuando se mencione el término *vulnerabilidad* en este documento. La *vulnerabilidad específica*, la cual hace referencia al peligro de deterioro en relación a una carga contaminante específica, no hace parte de los objetivos de esta guía, por tanto, no será tratada.

### Marco legal

En Colombia existe la siguiente normativa para la protección de las aguas subterráneas: el Decreto 2811 de 1974, la ley 9 de 1979; así mismo, las Autoridades Ambientales regionales expiden normas específicas en el área de su jurisdicción, como por ejemplo: el Acuerdo No 042 de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca –CVC<sup>(2)</sup>; y la Resolución No 444 de 17 de abril de 2008 de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda –CARDER.



El *Decreto 2811 de 1974*, por su parte, se refiere a las medidas de protección necesarias para la garantizar la calidad de las fuente de aguas subterráneas. La *Ley 9 de 1979* establece las disposiciones generales de las aguas subterráneas para el correcto aprovechamiento de los pozos para abastecimiento público; establece recomendaciones para prevenir la contaminación de aguas subterráneas por aguas de mar salobres, aguas residuales o contaminadas; establece las medidas para evitar la reducción del efecto purificador de los estratos permeables (u otras causas) como efecto de la extracción excesiva de agua subterránea; y establece medidas higiénicas y de vigilancia necesarias. Establece para las entidades encargadas de la entrega de agua potable al usuario (prestadores de servicios) la obligación de ejercer control sanitario en la superficie situada sobre el estrato acuífero y sobre las áreas de recarga para evitar su contaminación

En el *Acuerdo No 042 de la CVC* se define el concepto de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación, se recomiendan los métodos de evaluación (GOD, DRASTIC o BGR), se hacen requerimientos para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y se fijan restricciones para el desarrollo de algunas actividades potencialmente contaminantes (riego con aguas residuales tratadas, lagunas de tratamiento de aguas residuales, construcción de rellenos sanitarios, estaciones de servicio, actividades potencialmente peligrosas y aplicación de vinazas) en áreas cartografiadas con vulnerabilidad alta a extrema.

A través de la *Resolución No 444 de 17 de abril de 2008 (artículos 3 y 4)*, la CARDER impuso las restricciones relacionadas al uso del suelo, con base en la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, para aquellas actividades (nuevas o existentes) que representen un peligro o amenaza para la calidad de las aguas subterráneas.

## Enfoque

El concepto de “vulnerabilidad” admite enfoques muy polifacéticos. Según Custodio <sup>(3)</sup> la vulnerabilidad sería como una medida cualitativa o cuantitativa de la mayor o menor facilidad con la que se puede causar un perjuicio (daño, deterioro o degradación). En este sentido es necesario hacer referencia a un perjuicio potencial concreto y a la susceptibilidad que tiene un determinado medio natural a ser afectado por ese perjuicio. Por lo tanto la vulnerabilidad intrínseca se refiere a la sensibilidad del acuífero a una cierta acción o forma de acción y no a la intensidad, oportunidad y aplicación de esta acción, factores que conforman **el riesgo**, que no es objeto de esta Guía. . Para el caso concreto de los acuíferos, el bien a defender es el agua subterránea.

En las últimas décadas se ha observado en los países desarrollados un incremento en el interés por la contaminación del agua subterránea, desarrollándose diversos sistemas de evaluación de la vulnerabilidad regional de acuíferos con objeto de elaborar mapas de vulnerabilidad a diferentes escalas, los cuales ayudan a establecer estrategias de protección del agua subterránea y la planificación del usos de la tierra. Las escalas de trabajo a su vez limitarán la utilidad de estos mapas, los cuales serán orientativos cuando su nivel de evaluación es a escala nacional o regional y para administración o manejo (toma de decisiones) cuando son evaluados a escala semidetallada o detallada (Tabla 1).

**Tabla 1. Tipos de mapas según su nivel de evaluación.**

NIVEL DE EVALUACIÓN	ESCALA DE TRABAJO	TIPO DE MAPA
Escala Nacional. Reconocimiento Preliminar	Menor a 1:500.000	Orientativo
Escala regional	Normalmente a escala departamental 1:100.000 a 1:250.000 (Datos cada 10 Km)	
	Escala semidetallada	Local urbano/ Municipal 1:25.000 a 1:50.000 (Datos cada 200- 500m)
Escala detallada		Local/ Puntual 1:10.000 a 1:5.000 (Datos cada 50- 100 m)

La integración de la protección de las aguas subterráneas mediante mapas de vulnerabilidad en la **zonificación** o caracterización del territorio de una cuenca hidrográfica, es una herramienta de ayuda en la ordenación de los vertimientos potencialmente contaminantes, y para la aplicación de medidas contra la contaminación y en la elaboración de planes de manejo de acuíferos y de ordenación del territorio

### Definiciones

El término "vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas" fue introducido a finales de la década de los años sesenta por el hidrogeólogo francés Margat <sup>(4)</sup> y el concepto se basa en la tesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección a las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural, como derivados de actividades humanas. Aunque no existe una definición internacionalmente aceptada o reconocida del término de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, existiendo muchas definiciones como las presentadas en la Tabla 2, en la modificación del Decreto 1729 (en revisión) se adopta la siguiente definición: Características propias de un acuífero que determinan la sensibilidad del mismo a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o fenómenos naturales

**Tabla 2. Definiciones de Vulnerabilidad.**

AUTOR	DEFINICIÓN
Margat, 1968	Protección que ofrece el medio al agua subterránea contra las actividades antrópicas susceptibles de contaminar.
Albinet y Margat, 1970	Probabilidad de infiltración y difusión de un contaminante en un acuífero, según el tipo de formación geológica y condiciones hidrogeológicas.
Olmer y Rezác. 1974	Grado de peligrosidad determinado por las condiciones naturales, independientemente de la fuente de contaminación.
Villusem et al. 1983	Riesgo de que las sustancias químicas usadas en o cerca de la superficie puedan afectar a la calidad de las aguas subterráneas.
Foster. 1987	Características intrínsecas que determinan la sensibilidad de varias partes de un acuífero a ser afectado adversamente por un contaminante.
Bachmat y Colli. 1987	Sensibilidad de la calidad del agua subterránea frente a actividades antrópicas contaminantes.
Sotomikova y Vrba. 1987	Habilidad de un sistema hidrogeológico para protegerse de impactos externos, tanto antrópicos como naturales, que afectan su estado y características, en el tiempo y en el espacio.
Civita. 1988	La vulnerabilidad de un cuerpo acuoso es la posibilidad de infiltración y percolación de líquidos o soluciones acuosas de contaminantes a través de la zona no saturada.
Custodio. 1990	Sensibilidad de la calidad del agua subterránea a ser cambiada negativamente a consecuencia de la actividad antrópica.
S.E.P.A. 1992	Sensibilidad del acuífero: posibilidad de que un contaminante (pesticida), aplicado en o cerca de la superficie, pueda migrar al acuífero en función de las características geológicas, independientemente de las prácticas agrícolas o de las características del contaminante.
	Vulnerabilidad del agua subterránea: posibilidad de que un contaminante (pesticida), aplicado en la superficie o cerca de ella, pueda llegar al acuífero debido a las prácticas agrícolas, características del contaminante y sensibilidad hidrogeológica.
Zaporozec. 1994	Vulnerabilidad: propiedad intrínseca de un sistema de aguas subterráneas que depende de su sensibilidad a impactos naturales y/o humanos.
	Vulnerabilidad intrínseca (natural): es función de factores hidrogeológicos (características de un acuífero y de la superposición del suelo y materiales geológicos).
	Vulnerabilidad específica (integrada): depende de las propiedades intrínsecas de un sistema de aguas subterráneas y el uso presente o futuro de los recursos hídricos subterráneos.
Roins et. Al. 1994	La vulnerabilidad es el resultado de la superposición de las propiedades intrínsecas del suelo y la zona no saturada del acuífero.
Daly y Waren. 1994	Representa las características geológicas e hidrogeológicas que determinan la sensibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por actividades antrópicas.
Modificación Decreto 1729	Características propias de un acuífero que determinan la sensibilidad del mismo a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o fenómenos naturales

## 1. MARCO CONCEPTUAL

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se realiza a través de evaluación de tres factores, principalmente: (1) la capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada; (2) la resistencia o la inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes; y (3) los factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero son un valor indicativo (cualitativo) y no cuantitativo, por tanto los resultados que se obtienen de su evaluación son relativos y adimensionales. En este capítulo se describen estos tres factores de evaluación de la vulnerabilidad.

### 1.1. Capacidad de atenuación de la carga contaminante

La capacidad de atenuación de la carga contaminante se relaciona con los procesos que ocurren en el suelo y en la zona no saturada, como se describe a continuación.

#### 1.1.1. Suelo.

El suelo es la porción más superficial de la zona no saturada, caracterizado por una significativa actividad biológica, que a efectos prácticos pueden considerarse con espesores hasta 2 metros. La principal función del suelo desde el punto de vista de la vulnerabilidad, es la capacidad de atenuación de la carga contaminante, siendo mayor cuando el suelo tiene mayor contenido de materiales finos (limos y arcillas) y de materia orgánica. Estas características de los suelos los hacen más efectivos a la mayoría de los procesos que protegen las aguas subterráneas.

En general, los suelos arcillosos brindan mayor protección al acuífero. Sin embargo, en los suelos que contienen arcillas expansivas, la protección es mucho menor debido a las fisuras que se desarrollan como consecuencia de la contracción y expansión de sus partículas bajo el efecto de la humedad. Esta permeabilidad secundaria sucede mientras el suelo está seco (las fisuras se cierran cuando el suelo está hidratado), pero cuando se inicia la hidratación, los contaminantes pueden moverse a través de las fisuras que aún no se han cerrado.

#### 1.1.2. Zona no saturada.

La zona no saturada es el espesor comprendido entre la superficie y el nivel freático. En esta zona el contenido de agua es menor que la porosidad, es decir que el agua no ocupa todos los poros.

Las características de la zona no saturada son de gran importancia en la evaluación de la vulnerabilidad, porque es la primera defensa natural del acuífero contra los contaminantes. En esta zona el flujo es más lento y generalmente aerobio y alcalino, lo cual hace mayor el potencial para la interceptación, sorción y eliminación de bacterias y virus, y para la atenuación de metales pesados y otros químicos. Por tanto, un mayor espesor de la zona no saturada implica un mayor tiempo de tránsito de los contaminantes y mayor tiempo de contacto con el medio, lo que posibilita procesos de atenuación de mayor duración.

Entonces, un acuífero tendrá *baja vulnerabilidad* a la contaminación cuando la zona no saturada sea de gran espesor y con gran contenido de arcillas y materia orgánica. Por el contrario, se evaluará un acuífero con



*vulnerabilidad alta* cuando la zona-saturada tenga poco espesor y altos contenidos de arena, grava o rocas de alta permeabilidad.

## 1.2. Resistencia o Inaccesibilidad en sentido hidráulico.

La resistencia o inaccesibilidad de la zona no saturada en sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes es función de tres factores: (1) el régimen hidráulico del acuífero, grado de confinamiento, (2) la profundidad del nivel de agua en acuíferos libres o techo del acuífero confinado, (3) las características litológicas y el grado de consolidación de la zona no saturada o capas confinantes.

### 1.2.1. Régimen hidráulico del acuífero.

El régimen hidráulico del acuífero se refiere al grado de confinamiento de las aguas que contienen. Se distinguen así tres tipos de acuíferos: libres, confinados y semi-confinados. Así, por ejemplo, un acuífero confinado con un gran espesor confinante será menos vulnerable a la contaminación que un acuífero libre.

En caso de acuíferos multicapa se debe considerar el nivel permeable más superficial, salvo que se traten de pequeños niveles colgados. Asimismo, si existiese alguna duda sobre la continuidad y/o la naturaleza de los niveles confinantes, se considerará al acuífero como libre.

### 1.2.2. Profundidad del agua subterránea.

La profundidad del agua subterránea se refiere al *nivel freático* en los acuíferos libres y al *techo del acuífero* en los acuíferos confinados. La vulnerabilidad a la contaminación será menor en aquellos acuíferos que tengan un nivel freático a mayor profundidad. En estos casos, el espesor de la zona no saturada será mayor y, por lo tanto, el tiempo de tránsito para un contaminante en alcanzar el agua subterránea será mayor también, lo que proporciona más posibilidad de atenuación de una cierta carga contaminante por degradación o retención natural.

### 1.2.3. Características litológicas.

El tiempo de tránsito de un contaminante para alcanzar la zona saturada no es sólo función del espesor de la zona no saturada sino también de las características de los materiales que contiene. Estas características de la zona no saturada y de las capas confinantes hacen referencia a: (1) el *tipo de litología*, considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad o retención específica en la zona no saturada y (2) el *grado de consolidación*, teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad secundaria por fisuras.

En medios granulares, por ejemplo, el tamaño de los granos determina la permeabilidad del medio, así cuanto mayor sea la granulometría menor será la capacidad de atenuación de la zona no saturada o de las capas confinantes. Por el contrario, en medios con granos finos (suelos con contenidos de arcilla y limo) la permeabilidad es menor, haciendo que el recorrido de los contaminantes sea más tortuoso hacia el acuífero. En un medio fracturado, por su parte, la vulnerabilidad es función de la intensidad y densidad del fracturamiento.

La información relativa a este factor deberá servir para describir la influencia del terreno en las condiciones de flujo de agua y transporte de contaminantes.



### 1.3. Transporte de Contaminantes

#### 1.3.1. Topografía.

La topografía del terreno es un factor en la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos dado que las pendientes o las variaciones de la superficie pueden permitir la evacuación de los contaminantes a través de la escorrentía o, al contrario, facilitar su infiltración. Igualmente, la topografía influye en el desarrollo de los suelos y, por lo tanto, en la atenuación de la contaminación.

Por ejemplo, se establece que pendientes menores al 2% favorecen la infiltración y la evapotranspiración, dada la baja velocidad de la escorrentía. Por el contrario, pendientes mayores al 18% el agua lluvia escurre con facilidad y puede evacuar mayores cantidades de sustancias dispuestas sobre el terreno en forma disuelta o en suspensión.

#### 1.3.2. Recarga neta.

La recarga neta se define como el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo. El proceso de tránsito del agua hasta la recarga puede conllevar el arrastre de sustancias, convirtiéndose la recarga en un vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sales. Entonces, cuanto mayor es el volumen de recarga, más fácilmente puede ser transportada la carga contaminante. Por tanto, un acuífero tendrá una alta vulnerabilidad a la contaminación si existe un volumen de recarga alto y la zona no saturada es de poco espesor. Esto, a excepción que el volumen de la recarga sea tan grande que el contaminante se diluya hasta concentraciones permisibles.

## 2. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRINSECA

En esta sección se hará una descripción de las principales metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, su utilidad y limitaciones.

### 2.1. Métodos de Evaluación

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se agrupan en los cuatro modelos descritos a continuación.

1. Modelos de simulación. Usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.
2. Métodos estadísticos. Los métodos estadísticos son utilizados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación de la agua subterránea determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación observada, las condiciones ambientales observadas que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación (p.e. uso del fertilizante y ocurrencia séptica del tanque). Una vez un modelo de esta dependencia o de la relación se ha desarrollado con análisis estadístico, la probabilidad de la contaminación puede ser evaluada. La vulnerabilidad se expresa como probabilidad de contaminación. Cuanto más alta es la probabilidad de contaminación, más alta será la vulnerabilidad.
3. Métodos de superposición e índices (o paramétricos). Están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (*iV*). Para un método *n* de parámetros *P* y *n* factores de ponderación *fP*, el índice de vulnerabilidad *iV* se calcula como:

$$iV = \sum_{j=1}^n fP_j \times P_j$$

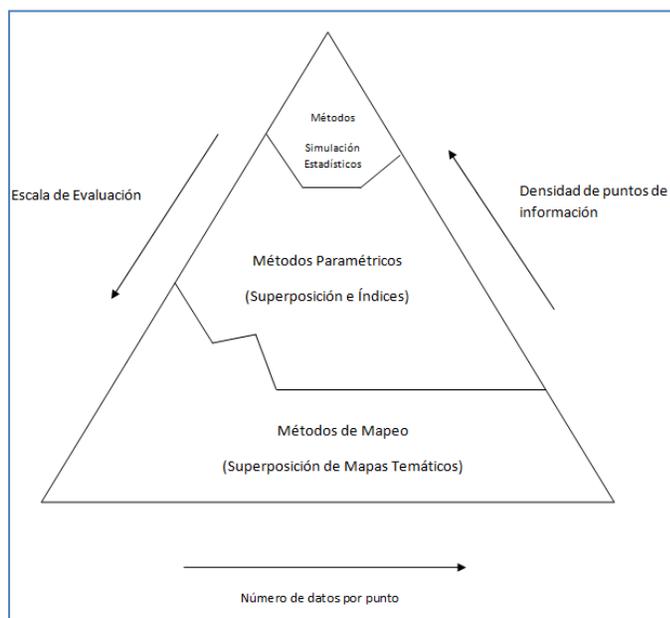
Mediante la obtención de este valor *iV*, y de acuerdo con el método usado, la vulnerabilidad de los acuíferos se clasifica desde baja, media, alta, muy alta hasta extrema, definidos en la Tabla 3 .

4. Ambientes Hidrogeológicos. Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

**Tabla 3. Definición Práctica de las clases de vulnerabilidad <sup>(5)</sup>.**

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados
Baja	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante

La selección y aplicación de cualquiera de los métodos mencionados dependerá de la información existente, de la densidad de puntos de información y de la escala de evaluación (ver Figura 1). Según estos criterios los métodos de simulación son los que requieren información más detallada.



**Figura 1. Interrelación entre la densidad de los puntos de información, el número de datos por punto y la escala de evaluación<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Modificado de Civitá <sup>(8)</sup>.

## 2.2. Métodos paramétricos

Dentro de los métodos paramétricos (de superposición e índices) se distinguen las siguientes metodologías: (1) los métodos de matriz, que utilizan parámetros muy seleccionados y sólo tienen aplicabilidad local. (2) Los métodos de puntuación (RS), en los que cada parámetro está dividido en clases a las que se atribuye una puntuación. La metodología más destacada es el GOD <sup>(5)</sup>. (3) Los métodos de puntuación y ponderación (PCSM), en los que además de asignar una puntuación cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador. Las metodologías más destacadas son DRASTIC <sup>(6)</sup>, SINTACS <sup>(7)</sup>, EPIK <sup>(8)</sup> y GALDIT. (4) Los métodos de relaciones analógicas (AR), como el AVI.

Esta sección está enfocada en la descripción de los métodos (2) y (3). En la Tabla 4 se presentan las cinco metodologías que serán tratadas en esta sección y se describen los factores que considera cada una para la evaluación de la vulnerabilidad.

### 2.2.1. Método GOD

El sistema de indexación GOD, propuesto por Foster (1987), es aplicable a áreas de trabajo con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de la información. Esta metodología comprende tres parámetros: G, O y D; cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación, (ver Figura 1), los cuales se describen a continuación

**G.**( Groundwater occurrence) Corresponde al grado de confinamiento hidráulico con la identificación del tipo de acuífero, su índice puede variar entre 0 y 1. El modo de ocurrencia varía entre la ausencia de acuíferos (evaluado con índice 0) en el extremo izquierdo y la presencia de un acuífero libre o freático (evaluado como índice 1) en el extremo derecho, pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.

**O.**( Overall aquifer class)Corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero o de las capas confinantes. Los índices más bajos (0,4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0,9 – 1,0) corresponden a rocas compactas fracturadas o karstificadas.

**D:** (Depth).Se refiere a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo del acuífero, en los confinados. Los índices más bajos (0,6) corresponden a acuíferos libres con profundidad mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1,0) corresponden a acuíferos que independientemente de la profundidad se encuentran en medios fracturados. Para el caso de los acuíferos libres la profundidad del nivel estático está sujeta a la oscilación natural.

El índice de vulnerabilidad GOD se obtiene, entonces, de multiplicar los valores asignados a cada parámetro

$$iV_{GOD} = G \times O \times D$$

**Tabla 4. Métodos paramétricos para determinar la vulnerabilidad intrínseca.**

MÉTODOS	FACTORES	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD
**DRASTIC (7)	<p>D: Profundidad del agua subterránea</p> <p>R: Recarga neta</p> <p>A: Litología del acuífero</p> <p>S: Tipo de suelo</p> <p>T: Topografía</p> <p>I: Impacto en el acuífero.</p> <p>Naturaleza de la zona no saturada</p> <p>C: Conductividad hidráulica del acuífero</p>	$iV = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$ <p>r: Factor de clasificación o valoración</p> <p>w: Factor de ponderación</p>
*GOD (6)	<p>G: Grado de confinamiento hidráulico.</p> <p>Hace referencia al tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea</p> <p>O: Litología de la zona no saturada.</p> <p>Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada.</p> <p>D: Profundidad del agua subterránea o del techo del acuífero confinado.</p>	$iV = G \times O \times D$ <p>Los parámetros G y O, pueden considerarse estables a lo largo del tiempo, mientras que el parámetro "D" es variable.</p>
**SINTACS (8)	<p>S: Profundidad del agua</p> <p>I: Recarga neta</p> <p>N: Zona no saturada</p> <p>T: Topografía</p> <p>A: Medio acuífero</p> <p>C: Conductividad hidráulica</p> <p>S: Suelo</p>	$iV = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$ <p>r: Puntuación (1 – 10)</p> <p>w: Peso (1 – 5)</p>
**EPIK <sup>1</sup> (9)	<p>E: Zona de intensa karstificación.</p> <p>P: Cobertura de protección</p> <p>I: Condiciones de infiltración</p> <p>K: Red kárstica.</p>	$iV = (a \times E) + (b \times P) + (g \times I) + (d \times K)$ <p>iV: factor de protección o índice de vulnerabilidad.</p> <p>E, P, I, K: puntuaciones de los parámetros</p> <p>a, b, g, d: factores de ponderación</p>
**GALDIT <sup>(2)</sup>	<p>G: Tipo de acuífero</p> <p>A: Conductividad hidráulica del acuífero</p> <p>L: Nivel del agua subterránea sobre el mar</p> <p>D: Distancia tierra adentro perpendicular a la línea de costa</p> <p>I: Impacto existente de la intrusión marina</p> <p>T: Espesor del acuífero</p>	$iV = (W_1 \times G) + (W_2 \times A) + (W_3 \times L) + (W_4 \times D) + (W_5 \times I) + (W_6 \times T)$ <p>W<sub>1</sub> a W<sub>6</sub> son pesos relativos asignados a los 6 factores.</p>

<sup>1</sup> Método para estimar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos

<sup>2</sup> Método aplicado para vulnerabilidad a la intrusión marina

\* Método de puntuación –RS. \*\* Método de puntuación y ponderación –PSCM..

iV = Índice de Vulnerabilidad

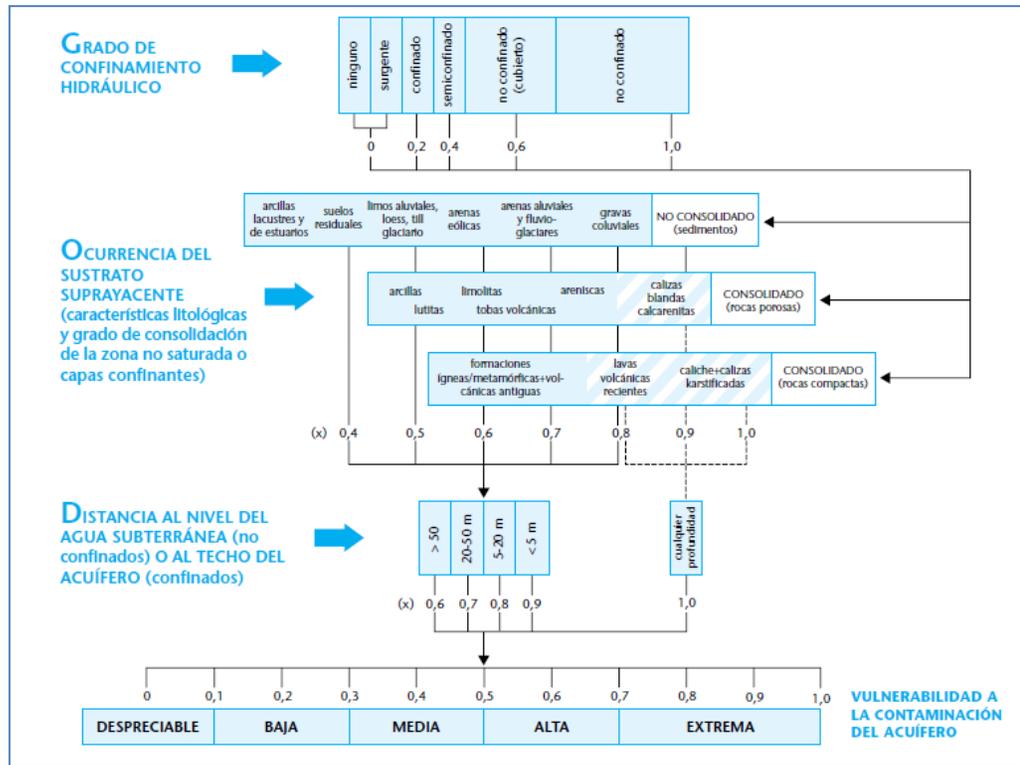


Figura 2. Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca <sup>(10)</sup>.

Los resultados del cálculo del IV pueden variar <0,1 y 1,0, obteniendo las categorías de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías de vulnerabilidad para el método GOD.

PUNTAJE	VULNERABILIDAD
0.7 – 1.0	Muy alta
0.5 – 0.7	Alta
0.3 – 0.5	Moderada
0.1 – 0.3	Baja
< 0.1	Muy baja

El método GOD presenta algunas soluciones especiales para evaluar los tres parámetros en el caso de acuíferos semiconfinados y para acuíferos poco profundos de mala calidad natural, normalmente salinos (ver Figura 3). Esta última situación requiere un mapeo específico, ya que estos acuíferos someros generalmente no necesitan protección especial, aún en los casos de alta vulnerabilidad a la contaminación antrópica, pero que sí la requieren los acuíferos semiconfinados subyacentes.

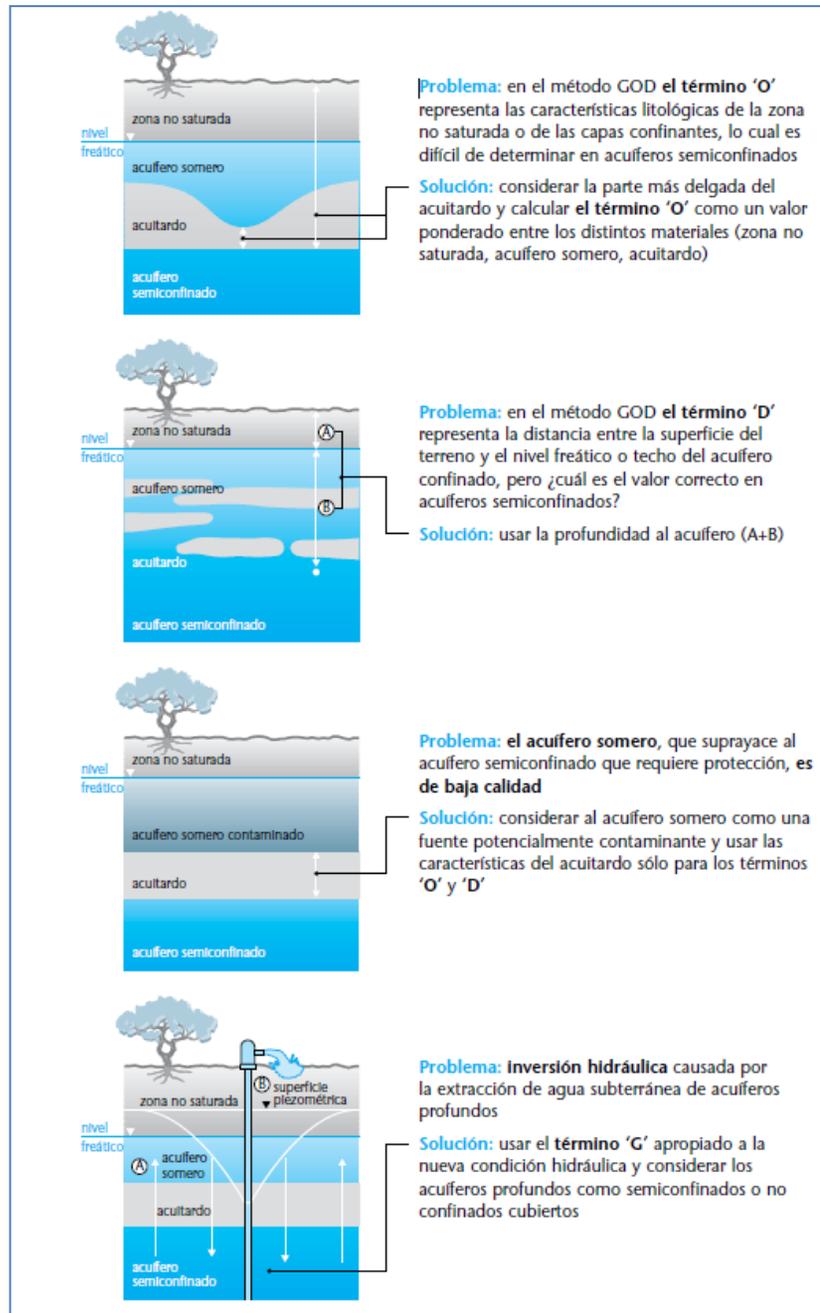


Figura 3. Interpretación de la vulnerabilidad de los acuíferos semi-confinados a la contaminación<sup>(10)</sup>. Método GOD.

### 2.2.2. Método DRASTIC

El método DRASTIC utiliza para la evaluación de la vulnerabilidad siete parámetros, D, R, A, S, T, I, C que dependen del clima, el suelo, el sustrato superficial y el subterráneo (ver Figura 4), descritos a continuación.

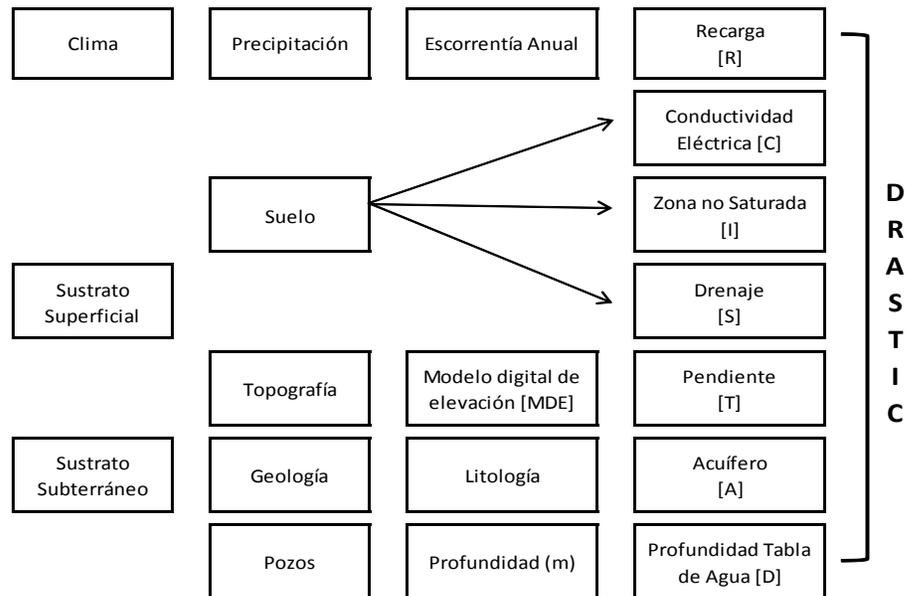


Figura 4. Variables de evaluación del método DRASTIC.

**D:** Profundidad del agua subterránea.

Indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.

**R:** Recarga neta.

Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero. La recarga resulta primariamente de la fracción de precipitación que no se evapotranspira y de la escorrentía superficial. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.

**A:** Litología y estructura del medio acuífero.

Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.

**S:** Tipo de suelo.

Representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática.

**T:** Topografía.

Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial.

I: Naturaleza de la zona no saturada.

Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.

C: Conductividad hidráulica del acuífero.

Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

De acuerdo con las características y el comportamiento, a cada parámetro se les asignan índices que van desde 1,0 (mínima vulnerabilidad) hasta 10,0 (máxima vulnerabilidad), presentados en la Tabla 6:

**Tabla 6. Valoración de parámetros para el método DRASTIC.**

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN

D (PROFUNDIDAD, m)	D <sub>r</sub>
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
> 30,5	1

R (RECARGAS, mm)	R <sub>r</sub>
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

A (LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO)	VALORACIÓN A <sub>r</sub>	VALOR TÍPICO A <sub>r</sub>
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Arenas y gravas de origen glaciar	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza kárstica	9 – 10	10

VARIABLE	VALORACIÓN
<b>S (TIPO DE SUELO)</b>	<b>S<sub>r</sub></b>
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

T (PENDIENTE, %)	T <sub>r</sub>
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN I <sub>r</sub>	VALOR TÍPICO I <sub>r</sub>
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ignea	2 – 8	4
Grava y arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA)		C <sub>r</sub>
m/día	cm/s	
0,04 – 4,08	$4,6 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-3}$	1
4,08 – 12,22	$4,7 \cdot 10^{-3} - 1,4 \cdot 10^{-2}$	2
12,22 – 28,55	$1,4 \cdot 10^{-2} - 3,4 \cdot 10^{-2}$	3
28,55 – 40,75	$3,4 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-2}$	6
40,75 – 81,49	$4,7 \cdot 10^{-2} - 9,5 \cdot 10^{-2}$	8
> 81,49	$> 9,5 \cdot 10^{-2}$	10

Además de la asignación de valores a cada parámetro, este método asigna un factor de ponderación a cada parámetro, que depende si el contaminante en cuestión es un pesticida (DRASTIC-P) o no (dado que los pesticidas son menos volátiles y más persistentes), con valores que están entre 1,0 y 5,0 (ver Tabla 7).

**Tabla 7. Factores de ponderación para el método DRASTIC.**

FACTORES DE PONDERACIÓN							
TIPO DE CONTAMINANTE	D <sub>w</sub>	R <sub>w</sub>	A <sub>w</sub>	S <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	C <sub>w</sub>
Pesticida (DRASTIC-P)	5	4	3	5	3	4	2
No Pesticida	5	4	3	2	1	5	3

El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, así:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$$

r: factor de clasificación o valoración

w: factor de ponderación

Los resultados pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), obteniendo los rangos de vulnerabilidad de la Tabla 8. En la práctica este índice varía entre 50 y 200. Si se considera contaminación por pesticidas (DRASTIC-P) podrá tomar valores comprendidos entre 26 y 260.

**Tabla 8. Grados de Vulnerabilidad –Método DRASTIC.**

GRADOS DE VULNERABILIDAD – D R A S T I C			
VULNERABILIDAD GENERAL		VULNERABILIDAD PESTICIDAS	
GRADO	VULNERABILIDAD	GRADO	VULNERABILIDAD
Muy bajo	23 – 64	Muy bajo	26 – 73
Bajo	65 – 105	Bajo	74 – 120
Moderado	106 – 146	Moderado	121 – 167
Alto	147 – 187	Alto	168 – 214
Muy alto	188 – 230	Muy alto	215 – 260

### 2.2.3. Método SINTACS

El método SINTACS es una aplicación a las características hidrogeológicas de Italia del método DRASTIC (utiliza los mismos parámetros); y emplea una escala de trabajo de mayor detalle. Esta metodología comprende siete parámetros: S, I, N, T, A, C, S; descritos a continuación.

**S:** Profundidad del agua subterránea. Equivale a **D** en DRASTIC.

**I:** Infiltración eficaz. Equivale a **R** en DRASTIC.

**N:** Efecto de autodepuración de la zona no saturada. Equivale a **I** en DRASTIC.

**T:** Tipo de suelo. Equivale a **S** en DRASTIC.

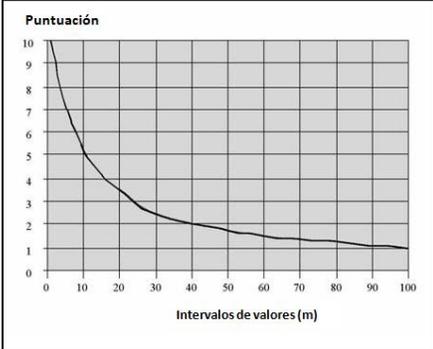
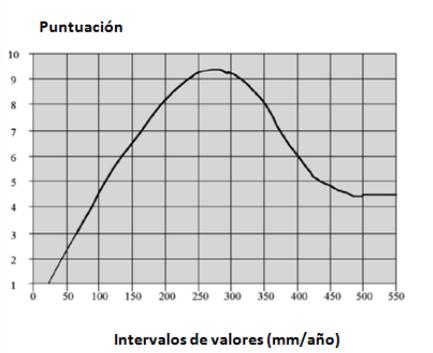
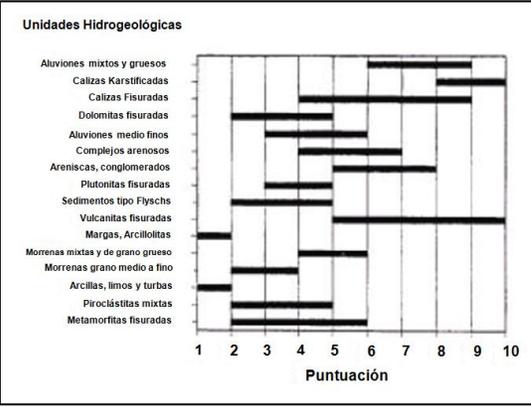
**A:** Litología del acuífero. Equivale a **A** en DRASTIC.

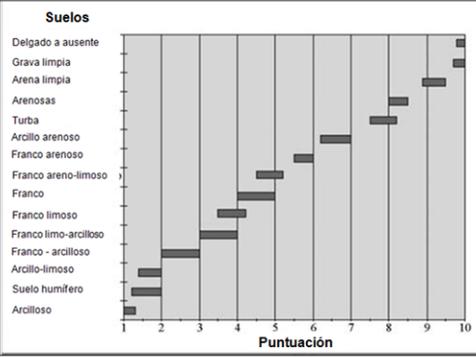
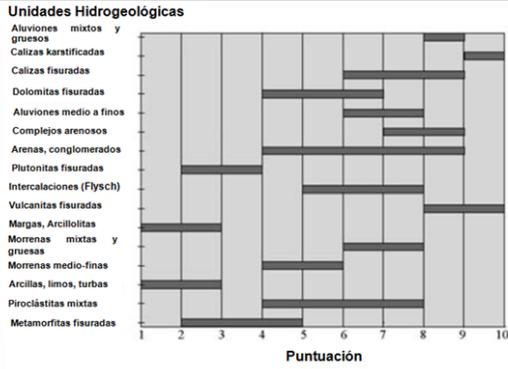
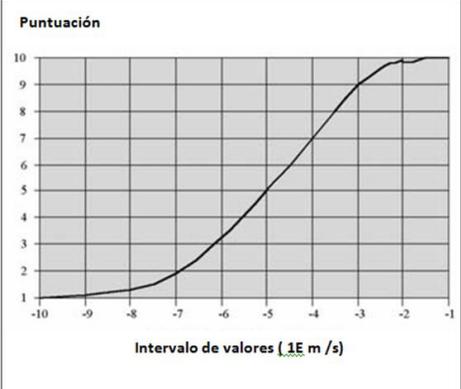
**C:** Conductividad hidráulica. Equivale a **C** en DRASTIC.

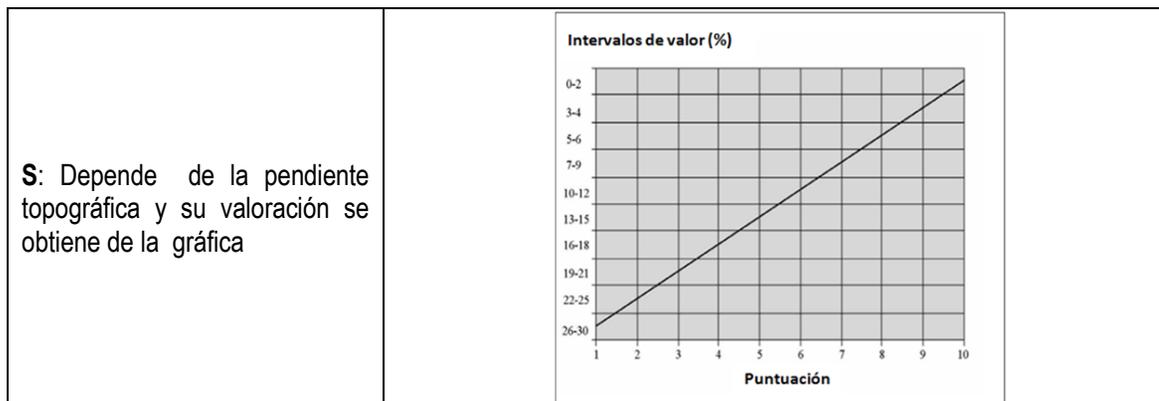
**S:** Pendiente de la superficie topográfica. Equivale a **T** en DRASTIC.

Al igual que en con el método DRASTIC, a cada parámetro se le asigna una puntuación de 1,0 –mínima vulnerabilidad, a 10,0 –máxima vulnerabilidad, de acuerdo con las figuras de la Tabla 9.

**Tabla 9. Puntuación de las variables para el método SINTACS.**

VARIABLE	PUNTUACIÓN																																		
<p><b>S:</b> La puntuación de la profundidad del acuífero se obtiene de la gráfica</p>																																			
<p><b>I:</b> Del balance hídrico se obtienen la recarga neta del acuífero. La puntuación se obtiene de la gráfica.</p>																																			
<p><b>N:</b> La puntuación depende de la naturaleza de la zona no saturada y se obtiene de la gráfica.</p>	 <table border="1"> <caption>Unidades Hidrogeológicas y su Puntuación</caption> <thead> <tr> <th>Unidad Hidrogeológica</th> <th>Puntuación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Aluviones mixtos y gruesos</td><td>6</td></tr> <tr><td>Calizas Karstificadas</td><td>8</td></tr> <tr><td>Calizas Fisuradas</td><td>8</td></tr> <tr><td>Dolomitas fisuradas</td><td>4</td></tr> <tr><td>Aluviones medio finos</td><td>4</td></tr> <tr><td>Complejos arenosos</td><td>5</td></tr> <tr><td>Areniscas, conglomerados</td><td>6</td></tr> <tr><td>Plutonitas fisuradas</td><td>3</td></tr> <tr><td>Sedimentos tipo Fyschs</td><td>5</td></tr> <tr><td>Vulcanitas fisuradas</td><td>6</td></tr> <tr><td>Margas, Arcillolitas</td><td>8</td></tr> <tr><td>Morrenas mixtas y de grano grueso</td><td>2</td></tr> <tr><td>Morrenas grano medio a fino</td><td>3</td></tr> <tr><td>Arcillas, limos y turbas</td><td>2</td></tr> <tr><td>Piroclásticas mixtas</td><td>3</td></tr> <tr><td>Metamorfitas fisuradas</td><td>5</td></tr> </tbody> </table>	Unidad Hidrogeológica	Puntuación	Aluviones mixtos y gruesos	6	Calizas Karstificadas	8	Calizas Fisuradas	8	Dolomitas fisuradas	4	Aluviones medio finos	4	Complejos arenosos	5	Areniscas, conglomerados	6	Plutonitas fisuradas	3	Sedimentos tipo Fyschs	5	Vulcanitas fisuradas	6	Margas, Arcillolitas	8	Morrenas mixtas y de grano grueso	2	Morrenas grano medio a fino	3	Arcillas, limos y turbas	2	Piroclásticas mixtas	3	Metamorfitas fisuradas	5
Unidad Hidrogeológica	Puntuación																																		
Aluviones mixtos y gruesos	6																																		
Calizas Karstificadas	8																																		
Calizas Fisuradas	8																																		
Dolomitas fisuradas	4																																		
Aluviones medio finos	4																																		
Complejos arenosos	5																																		
Areniscas, conglomerados	6																																		
Plutonitas fisuradas	3																																		
Sedimentos tipo Fyschs	5																																		
Vulcanitas fisuradas	6																																		
Margas, Arcillolitas	8																																		
Morrenas mixtas y de grano grueso	2																																		
Morrenas grano medio a fino	3																																		
Arcillas, limos y turbas	2																																		
Piroclásticas mixtas	3																																		
Metamorfitas fisuradas	5																																		

<p>T: La valoración es función del tipo de textura que presenta el suelo y se obtiene del gráfico</p>	 <p><b>Suelos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Delgado a ausente</li> <li>Grava limpia</li> <li>Arena limpia</li> <li>Arenosas</li> <li>Turba</li> <li>Arcillo arenoso</li> <li>Franco arenoso</li> <li>Franco areno-limoso</li> <li>Franco</li> <li>Franco limoso</li> <li>Franco limo-arcilloso</li> <li>Franco - arcilloso</li> <li>Arcillo-limoso</li> <li>Suelo humífero</li> <li>Arcilloso</li> </ul> <p>Puntuación</p>
<p>A: Depende de las características hidrogeológicas de la zona saturada, correspondiente al acuífero. La puntuación se extrae del gráfico.</p>	 <p><b>Unidades Hidrogeológicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aluviones mixtos y gruesos</li> <li>Calizas karstificadas</li> <li>Calizas fisuradas</li> <li>Dolomitas fisuradas</li> <li>Aluviones medio a finos</li> <li>Complejos arenosos</li> <li>Arenas, conglomerados</li> <li>Plutonitas fisuradas</li> <li>Intercalaciones (Fylsch)</li> <li>Vulcanitas fisuradas</li> <li>Margas, Arcillolitos</li> <li>Morrenas mixtas y gruesas</li> <li>Morrenas medio-finas</li> <li>Arcillas, limos, turbas</li> <li>Piroclásticas mixtas</li> <li>Metamorfitas fisuradas</li> </ul> <p>Puntuación</p>
<p>C: La valoración de la conductividad hidráulica del acuífero se extrae del gráfico, en donde en abscisas viene representada dicha conductividad en valores exponenciales de m/s.</p>	 <p><b>Puntuación</b></p> <p>Intervalo de valores (1E m/s)</p>



Cada variable se pondera de acuerdo con los siguientes criterios y se les asignan los pesos presentados en la Tabla 10:

- ✓ **Ordinaria:** Áreas estériles sin cultivar o con cultivos que no utilizan pesticidas.
- ✓ **Fuentes difusas de contaminación potencial:** áreas sujetas a un uso abundante de pesticidas, efluentes orgánicos, depósitos de sedimentación y dispersión de aguas residuales, oleoductos, vertederos incontrolados, descargas de alcantarillas, áreas industriales activas o abandonadas...
- ✓ **Drenaje de cuerpos hídricos superficiales:** Áreas que dependen de la red hidrográfica natural y/o artificial, incluidas las áreas de regadío con grandes volúmenes de agua.
- ✓ **Karstificación profunda:** Áreas fuertemente karstificadas tanto en la superficie como en el subsuelo, que presenta rápidas conexiones entre la superficie y el acuífero

**Tabla 10. Factores de Ponderación –método SINTACS.**

SITUACIÓN	VARIABLE						
	S <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	N <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	A <sub>w</sub>	C <sub>w</sub>	S <sub>w</sub>
Ordinaria	5	4	5	2	3	3	2
Fuentes difusas	5	5	4	5	3	2	2
Drenaje	4	4	4	2	5	5	2
Karstificación	2	5	1	3	5	5	5

El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, así:

$$iV_{SINTACS} = (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (N_r \times N_w) + (T_r \times T_w) + (A_r \times A_w) + (C_r \times C_w) + (S_r \times S_w)$$

r: factor de clasificación o valoración

w: factor de ponderación

Los valores índices varían entre 23 y 260, con grados de vulnerabilidad de muy bajo a muy elevado, como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11. Evaluación de la Vulnerabilidad –método SINTACS.**

GRADO DE VULNERABILIDAD	VALOR
Muy bajo	23 – 80
Bajo	81 – 105
Medio	106 – 140
Alto	141 – 186
Elevado	187 – 210
Muy elevado	211 – 260

2.2.4. Método EPIK

El método EPIK es una metodología desarrollada para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos kársticos, y utiliza cuatro parámetros:

**E:** Zona de intensa karstificación.

**P:** Cobertura de protección.

**I:** Condiciones de infiltración.

**K:** Red kárstica.

En contraposición con las otras metodologías, el método EPIK asigna a cada parámetro valores mayores a medida que los factores de protección del acuífero aumentan, presentados en la Tabla 12.

**Tabla 12. Descripción y valoración de variables –método EPIK.**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
VARIABLE	<b>E: ZONA DE INTENSA KARSTIFICACIÓN</b>	
E1	Red kárstica típica (dolinas, depresiones, cavidades, grutas...)	1
E2	Existen superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos (valles secos, alineación de dolinas...)	2
E3	Ausencia de morfología epikárstica	3
VARIABLE	<b>P: COBERTURA DE PROTECCIÓN</b>	
P1	Ausencia de capa protectora	1
P2	Cubierta protectora de poco espesor	2
P3	Capa protectora de espesor medio	3
P4	Cubierta protectora de baja permeabilidad	4
VARIABLE	<b>I: CONDICIONES DE INFILTRACIÓN</b>	
I1	Regiones con vías accesibles para la infiltración discreta	1
I2	Zonas con pendientes moderadas	2
I3	Zonas con elevadas pendientes	3
VARIABLE	<b>K: RED KÁRSTICA</b>	
K1	Red kárstica bien desarrollada	1
K2	Zonas pobremente karstificadas	2
K3	Acuíferos kársticos con descarga en medios porosos, o que presentan fisuración, pero subordinada	3

Igualmente, a cada parámetro se le asigna un factor de ponderación (ver Tabla 13); y la sumatoria del producto de los parámetros y sus factores de ponderación da como resultado el índice de vulnerabilidad intrínseca o factor de protección, como se muestra a continuación:

$$iV_{EPIK} = (a \times E) + (b \times P) + (g \times I) + (d \times K)$$

$$\text{Factores de ponderación} \begin{cases} a = 3 \\ b = 1 \\ g = 3 \\ d = 2 \end{cases} \text{ Propuestos por Doerfliger y Zwahlen (1997)}$$

**Tabla 13. Grados e índices de Vulnerabilidad del acuífero kárstico –método EPIK.**

GRADO DE VULNERABILIDAD	VALOR EPIK (ÍNDICE DE PROTECCIÓN)
Alto	9 – 19
Medio	20 – 25
Bajo	26 – 34

### 2.2.5. Evaluación de la Vulnerabilidad a la Intrusión Marina. Método GALDIT

Los acuíferos costeros conservan una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que empuja por penetrar tierra adentro. Como se muestra en la Figura 5, esta relación se presenta, generalmente, en forma de cuña. La penetración de la cuña de agua salada (intrusión marina) depende de características del acuífero como la geometría y las propiedades hidráulicas (permeabilidad, nivel piezométrico, etc.); y es función inversa del flujo de agua dulce que descarga al mar a lo largo de la costa. La intrusión marina es un proceso dinámico, en el que el frente de agua salada avanza tierra adentro durante los períodos de menor recarga del acuífero, y retrocede hacia el mar cuando la recarga aumenta.



**Figura 5. Equilibrio agua dulce –agua salada<sup>(11)</sup>.**

Sin embargo, las actividades humanas pueden afectar el equilibrio natural de los acuíferos costeros, dado que las extracciones por bombeo del acuífero de agua dulce producen descensos en la superficie piezométrica, provocando una menor descarga de agua dulce al mar y, consecuentemente, produciendo la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro, como se muestra en la Figura 6. Esta intrusión provocará la contaminación del acuífero costero como consecuencia del aumento de la salinidad en las aguas subterráneas y, posteriormente, la limitación de su aprovechamiento para determinados usos.

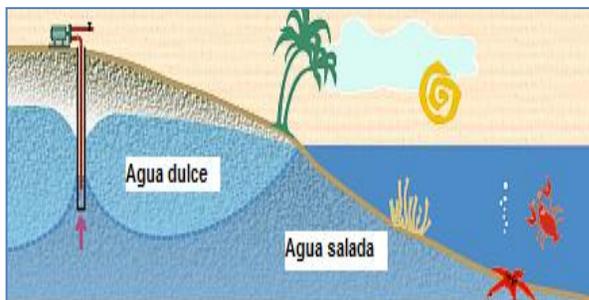


Figura 6. Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación <sup>(11)</sup>.

La invasión de agua marina puede producirse de diferentes formas, siendo las dos más frecuentes: (1) el avance horizontal de la interface hacia el interior y (2) el ascenso vertical en forma de cono de la interface por bombeo intensivo. Por lo tanto, la posición de la interface es una variable de decisión a tener en cuenta a la hora de gestionar los recursos del acuífero<sup>1</sup>.

Para evaluar el avance de la cuña marina o la vulnerabilidad de los acuíferos a la intrusión marina, existen muchos métodos, pero en esta sección sólo se hará referencia al método GALDIT, el cual comprende los parámetros descritos en la Tabla 14.

Tabla 14. Variables de evaluación del Método GALDIT <sup>(12)</sup>.

Variable	Puntuación					Peso
	1	3	5	7	9	
<b>G:</b> Tipo de acuífero		Confinado	Ligeramente confinado	No confinado (libre)		1
<b>A:</b> Conductividad hidráulica del acuífero (m/día)	<3	3 – 8	8 – 15	15 – 30	>30	2
<b>L:</b> Nivel del agua subterránea sobre el mar (m)	>10	10 – 0	0 – (-5)	(-5) – (-10)	<-10	5
<b>D:</b> Distancia tierra dentro perpendicular a la línea de costa	>20	20 – 12	12 – 7.7	7 – 3	<3	3
<b>I:</b> Impacto existente de la intrusión marina [Cl/HCO <sub>3</sub> ] (meq/l)	<0.25	0.25 – 0.5	0.5 – 1	1 – 1.5	>1.5	6
<b>T:</b> Espesor del acuífero (m)	>25	25 – 15	15 – 10	10 – 5	<5	3

El índice GALDIT se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$iVGALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i \times R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i}$$

Así, el valor máximo del índice GALDIT es 10, como se muestra en el siguiente ejemplo:

<sup>1</sup> Ghyben (1889) y Herzberg (1901) fueron los primeros en establecer una fórmula para estimar la profundidad de esta interface.

$$\sum_{i=1}^6 max = \frac{(1) \times R_1 + (3) \times R_2 + (4) \times R_3 + (4) \times R_4 + (1) \times R_5 + (2) \times R_6}{1 + 3 + 4 + 4 + 1 + 2}$$

$$\sum_{i=1}^6 max = \frac{(1) \times 10 + (3) \times 10 + (4) \times 10 + (4) \times 10 + (1) \times 10 + (2) \times 10}{1 + 3 + 4 + 4 + 1 + 2}$$

$$\sum_{i=1}^6 max = 10$$

Y el valor mínimo es 2.5, como se muestra en el ejemplo:

$$\sum_{i=1}^6 min = \frac{(1) \times R_1 + (3) \times R_2 + (4) \times R_3 + (4) \times R_4 + (1) \times R_5 + (2) \times R_6}{1 + 3 + 4 + 4 + 1 + 2}$$

$$\sum_{i=1}^6 min = \frac{(1) \times 2,5 + (3) \times 2,5 + (4) \times 2,5 + (4) \times 2,5 + (1) \times 2,5 + (2) \times 2,5}{1 + 3 + 4 + 4 + 1 + 2}$$

$$\sum_{i=1}^6 min = 2,5$$

Los resultados de esta evaluación permiten, por tanto, clasificar la vulnerabilidad de los acuíferos costeros en tres grupos de rangos, como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15. Clasificación de la Vulnerabilidad –método GALDIT.**

RANGO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
≥7.5	Alta
5 – 10	Moderada
< 5	Muy baja

### 2.3. El Método a Elegir

El método a elegir para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación depende principalmente de la disponibilidad de la información, es decir:

- ✓ Número de datos;
- ✓ Densidad de la información. Distribución espacial de los mismos según escala de evaluación;
- ✓ Calidad de los datos.

También es muy importante tener las siguientes consideraciones:

- ✓ Al DRASTIC se le critica la cantidad de variables que emplea, la dependencia entre algunas de ellas y que las ponderaciones que realiza a las mismas pueden ser cuestionables. En éste, uno de los factores que agrega mayor incertidumbre es la recarga, pues cuando no está disponible de manera distribuida y aproximada, debe ser deducida de información secundaria. Además con la recarga no se considera el efecto de dilución, sino que



sólo está definida para valorar la capacidad de infiltración, que es la misma característica considerada por el parámetro topografía

- ✓ SINTACS es una derivación del DRASTIC, y por tanto se le hacen las mismas críticas.
- ✓ GOD es un método muy sencillo, fácil de aplicar en condiciones de escasa información y a una escala regional (hasta 1:100.000). No considera un factor tan importante como la recarga.
- ✓ Sin embargo, la aplicación de estos métodos así como de otros métodos en un mismo acuífero puede dar resultados muy variables con lo cual la validez de estos resultados es relativa.

Por tanto, es indispensable evaluar los resultados de estas metodologías y modificarlas o validarlas teniendo en cuenta el conocimiento de la zona y la información disponible. Se recomienda por lo tanto confrontarlos o compararlos con medidas de campo como los nitratos y no trabajar con un único método

### 3. MAPAS DE VULNERABILIDAD

El mapa de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación representa sectores de vulnerabilidad homogénea para un territorio dado (ver Figura 7), como resultado de la aplicación de las metodologías descritas en el Capítulo 2. Estos mapas representan la capacidad que tiene el medio para proteger los acuíferos de la contaminación. Cabe aclarar que estos mapas representan la vulnerabilidad del acuífero y no de los puntos de captación específicos (perímetros de protección) y, por consiguiente, buscan proteger el recurso hídrico subterráneo y no a las captaciones.

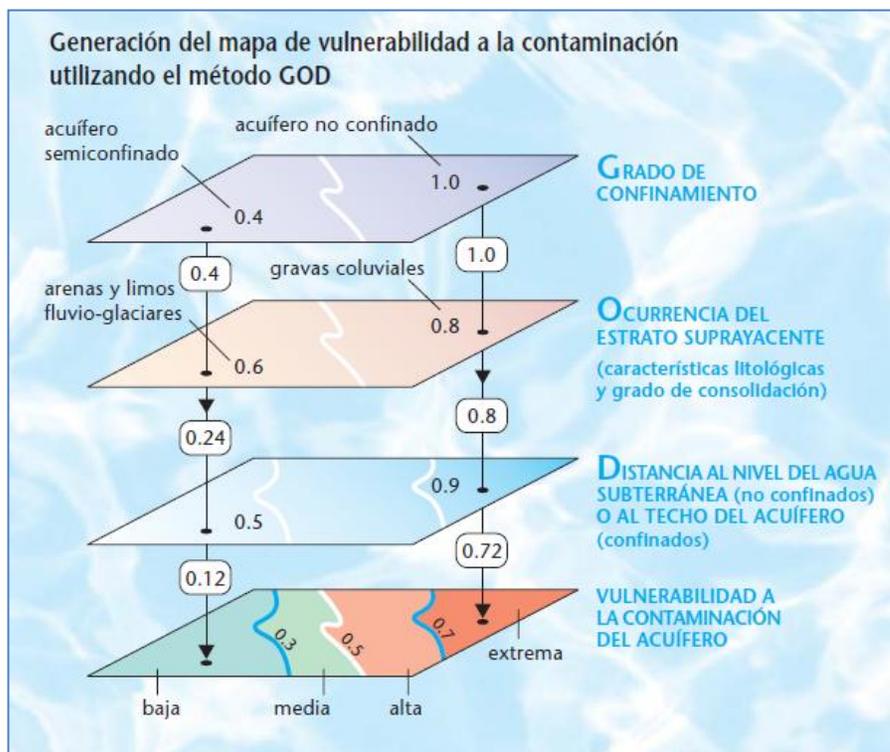


Figura 7. Mapa de Vulnerabilidad -método GOD<sup>(10)</sup>.

Los mapas de vulnerabilidad son, sin embargo, una primera aproximación del riesgo potencial del agua subterránea a la contaminación; y deben ser actualizados periódicamente –a medida que la información que alimenta el modelo es actualizada o ampliada. En la teoría y en la práctica, estos mapas involucran muchas simplificaciones geológicas e hidrogeológicas; que dependiendo de la escala de evaluación pueden ser de tipo orientativo o de manejo y administración.

Por último, los mapas de vulnerabilidad son herramientas de toma de decisión para reguladores, planificadores e inversionistas, en cuanto a nuevas propuestas de desarrollo, de control de contaminación y de monitoreo de la calidad del agua subterránea. Igualmente, permiten a los administradores y reguladores del recurso establecer

medidas de protección de las aguas subterráneas, y tomar las medidas preventivas y/o correctivas sobre el uso del suelo y la explotación de este recurso.

### 3.1. Leyenda del Mapa de Vulnerabilidad.

La Asociación Internacional de Hidrogeólogos ha elaborado una Leyenda Estándar Internacional (1995) para mapas hidrogeológicos, donde se proponen los colores para el mapa vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación presentados en la Figura 8. Esta leyenda internacional fue adoptada por INGEOMINAS para la cartografía de vulnerabilidad.

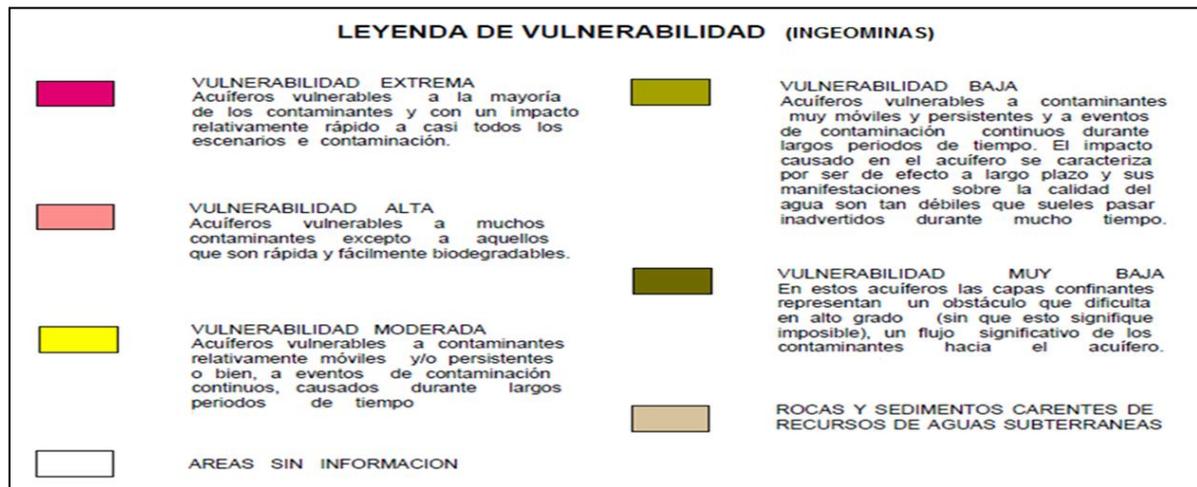
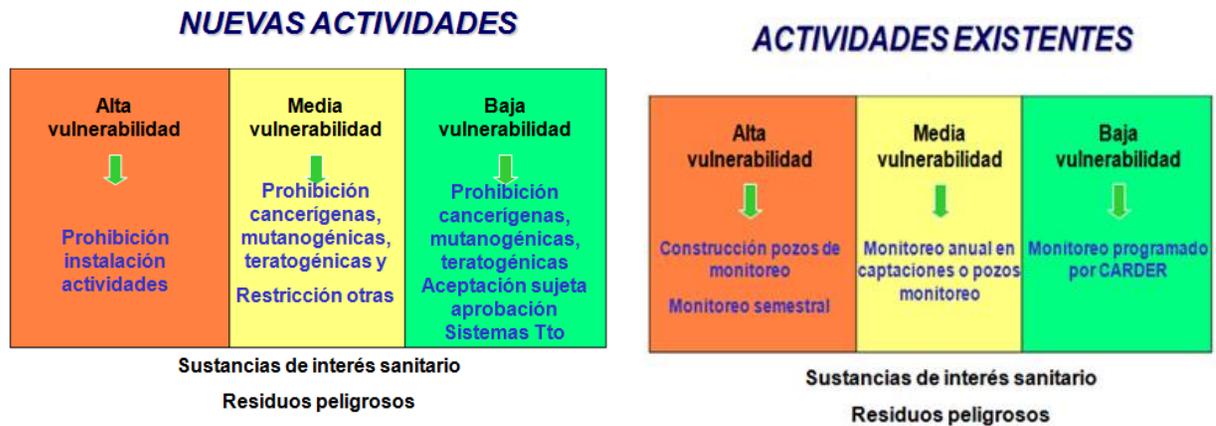


Figura 8. Leyenda de Vulnerabilidad <sup>(13)</sup>.

#### 3.1.1. Utilidad y limitaciones de los mapas de Vulnerabilidad

Las principales **utilidades** de los mapas de vulnerabilidad son:

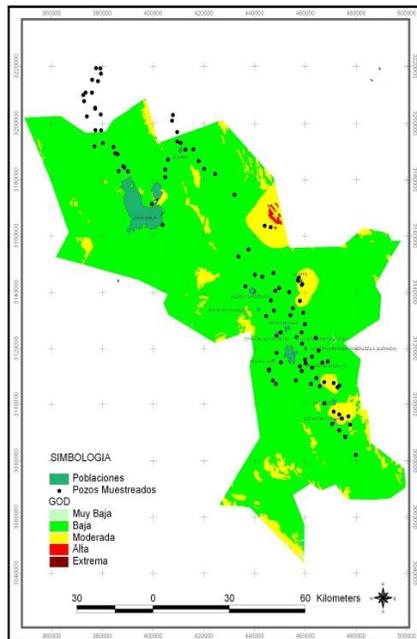
- Son una herramienta de apoyo en la toma de decisiones sobre la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos. Un ejemplo de la utilidad de estos mapas de vulnerabilidad es la Resolución No. 444 de 17 de abril de 2008 (artículos 3 y 4) de la CARDER (Corporación Autónoma Regional de Risaralda), mediante la cual según el grado de vulnerabilidad del acuífero, restringe el desarrollo de actividades y define la frecuencia y objetivo del monitoreo (comprobación de afectación al recurso, acciones de remediación o y protección, cese al vertimiento, posible relocalización), Figura 9.
- En los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, permiten identificar zonas donde se prohíben o restringen determinados usos del suelo, que representen una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas
- Establecer prioridades relacionadas a la realización de investigaciones detalladas y a la instalación de redes de monitoreo (frecuencia y parámetros a analizar).
- Permiten diseñar e implementar proyectos de educación a la comunidad en general, relacionados con la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea.



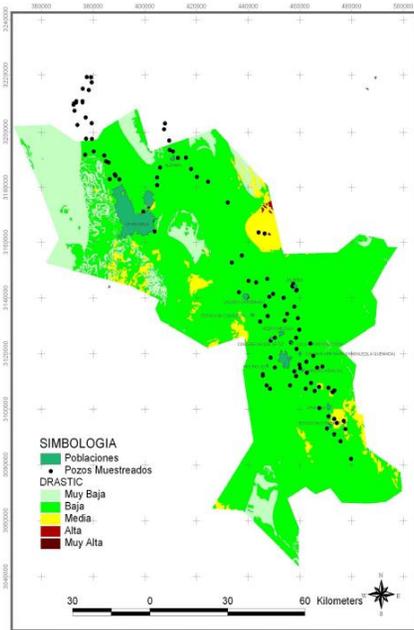
**Figura 9. Prohibiciones o Restricciones de actividades según grado de Vulnerabilidad del acuífero.**

Las limitaciones más relevantes son: las siguientes

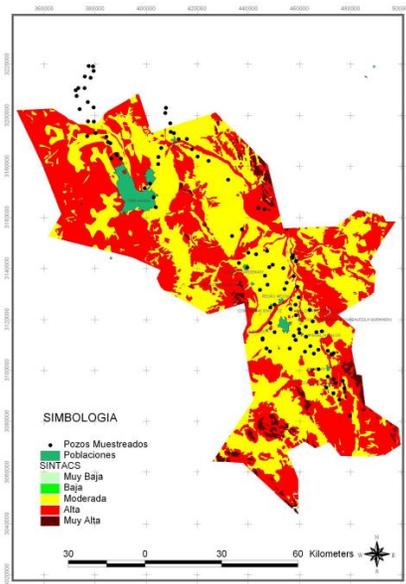
- a) Resultados muy diferentes aplicando varias metodologías y con el mismo nivel de información. En un estudio realizado por el CEA-ITESM en México, se demostró que. para un mismo escenario y una misma base de datos, los resultados de aplicar los métodos GOD, DRASTIC y SINTACS, son similares en los dos primeros y totalmente diferente con el último (ver Figura 10).
- b) Incertidumbre acerca de la validez de cada metodología. Incertidumbre debida a la escasa experiencia en la validación y verificación a nivel mundial, a la calidad de los datos disponibles, a la comprensión incompleta de los procesos ambientales pertinentes, a la predicción de los fenómenos y a los errores en la agregación de información.
- c) Solamente se considera el flujo vertical descendente proveniente de las fuentes potenciales de contaminación antrópica existente en la superficie del terreno. En los métodos de evaluación expuestos, sólo se considera el flujo vertical descendente, a excepción del GALDIT que considera flujos laterales.



Mapa de Vulnerabilidad utilizando el método GOD



Mapa de Vulnerabilidad utilizando el método DRASTIC



Mapa de vulnerabilidad usando la metodología SINTACS

Figura 10. Comparación de los métodos de evaluación de Vulnerabilidad para acuíferos <sup>(14)</sup>.

### 3.2. Experiencias en el país en evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.

En Colombia, la metodología para la evaluación de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación más ampliamente usada es GOD. A escala regional, (1:500.000) se tienen la vulnerabilidad de algunas planchas del Atlas Hidrogeológico de Colombia, y a escala un poco más detallada que la anterior (1:250.000 o 1:100.000), algunos mapas departamentales. A escala semidetallada o escalas mayores se ha evaluado la vulnerabilidad en algunos acuíferos del país. A continuación se presentan algunas experiencias en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y sus resultados.

#### 3.2.1. Mapas a Escala regional

Mapa de Vulnerabilidad del Departamento de Sucre (escala 1:250.000). Este mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del mapa del departamento de Sucre por su escala, es tipo orientativo y por lo tanto es útil para que las autoridades ambientales competentes tomen acciones preventivas y para definir las áreas que requieren estudios de detalle. (Figura 11)

Mapa de Vulnerabilidad de la zona sur del Acuífero Aluvial del Valle del Cauca. En cuanto a la aplicación de este mapa de vulnerabilidad, Figura 12, la CVC –Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, mediante el Acuerdo 042 de 2010, restringe o condiciona las actividades potencialmente contaminantes descritas en la Tabla 16. También exige a los usuarios que realizan actividades potencialmente contaminantes realizar estudios detallados de vulnerabilidad intrínseca y la perforación de pozos de monitoreo en los sectores más vulnerables.

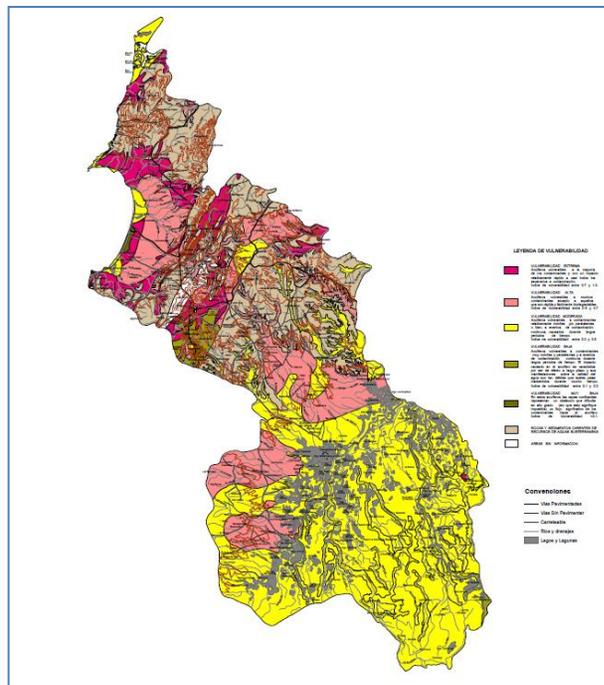


Figura 11. Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca de Sucre<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Escala 1:250.000. INGEOMINAS, 2003.

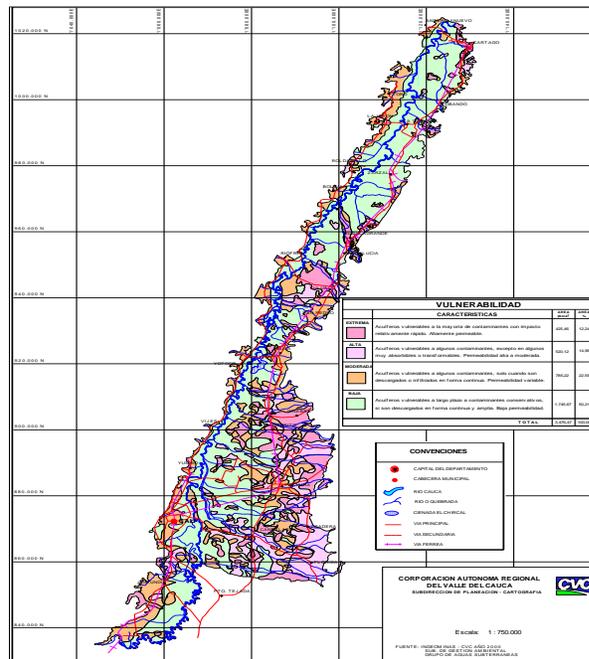


Figura 12. Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Aluvial del Valle del Cauca.

### 3.2.2. Mapas de Vulnerabilidad a escala semidetallada

**Vulnerabilidad del Acuíferos del Valle del Cauca a la Contaminación en la Zona Sur del Valle del Cauca** (Estimación de la Vulnerabilidad a la Contaminación en el Sur del Valle del Cauca. Análisis de Metodologías. Rojas L.; Vélez M.V.). De los métodos del tipo índice y superposición se usaron y compararon seis, DRASTIC, GOD, GODS, BGR, PATHS, AVI. Posteriormente se realizó una simulación de un evento de infiltración puntual, con el modelo HYDRUS, con el cual se estimaron los tiempos de viaje de una sustancia a través de la zona no saturada, los cuales se asociaron a grados de vulnerabilidad, con base en el criterio de movilidad del contaminante. Asumiendo que este último método representa mejor las condiciones hidrogeológicas de la zona no saturada los resultados fueron contrastados con los mapas de índices y superposición, para identificar el índice que mayor relación presentó con éste. Una vez se conocieron las zonas calificadas como "Muy vulnerables" se simuló un evento de contaminación del acuífero utilizando Visual MODFLOW.

Los resultados de la evaluación de vulnerabilidad intrínseca realizados en este estudio, por los métodos DRASTIC y GOD, se presentan en las Figuras 13 y 14.

**Tabla 16. Vulnerabilidad del acuífero y actividades potencialmente contaminantes.**

ACTIVIDADES POTENCIALMENTE CONTAMINANTES	VULNERABILIDAD		
	ALTA	MODERADA	BAJA
<b>LAGUNAS DE INFILTRACIÓN</b>			
Efluente industrial	PU	PA	PA
Agua de enfriamiento	A	A	A
Efluente municipal	PA	A	A
<b>DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS POR RELLENO</b>			
Industrial peligroso	U	U	PA
Otro industrial	PU	PA	A
Doméstico municipal	PA	PA	A
Inerte de construcción	A	A	A
Cementerio	PA	A	A
<b>EXCAVACIÓN EN TIERRA</b>			
Minería profunda	PU	PA	A
Minería a tajo abierto y canteras	PA	PA	A
Construcción	A	A	A
<b>TANQUES SÉPTICOS, POZOS NEGROS Y LETRINAS</b>			
Individuales	A	A	A
Comunales, edificios públicos	PA	A	A
<b>DRENAJE POR INFILTRACIÓN</b>			
Lechos de edificios	A	A	A
Carreteras secundarias y áreas de recreación	A	A	A
Garajes y áreas de parqueo	PA	A	A
Carreteras principales	PA	A	A
Áreas industriales	PU	PA	A
<b>APLICACIÓN DE EFLUENTES AL TERRENO</b>			
Industrias alimenticias	PA	A	A
Otras industrias	PA	PA	A
Aguas municipales servidas	PA	A	A
Lodos municipales	PA	A	A
Lodos agrícolas	A	A	A
<b>LOCALES INDUSTRIALES</b>			
Almacenamiento de químicos líquidos	PU	PA	PA
Almacenamiento de combustibles hidrocarburos	PA	PA	A
Almacenamiento de químicos sólidos	PA	A	A
<b>GANADERÍA INTENSIVA</b>			
Efluentes de lagunas	PA	A	A
<p><b>U:</b> No aceptable en la mayoría de los casos.  <b>PU:</b> Probablemente no aceptable, excepto en algunos casos sujetos a investigación detallada y a un diseño especial.  <b>PA:</b> Probablemente aceptable, sujeto a investigación y diseños específicos.  <b>A:</b> Aceptable a diseño estándar.</p>			

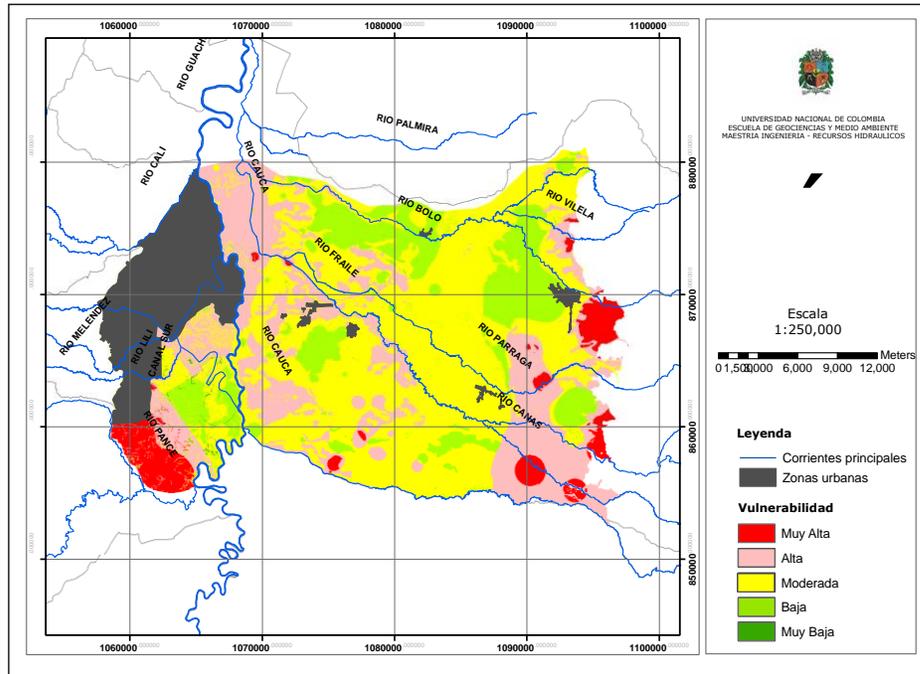


Figura 13. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice DRASTIC.

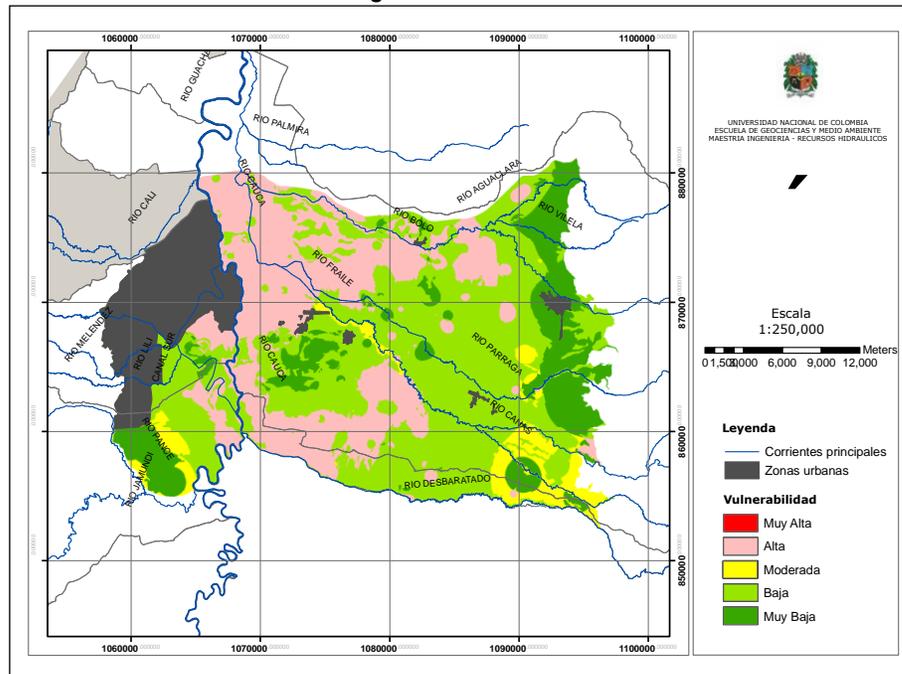


Figura 14. Vulnerabilidad a la contaminación según el índice GOD.

Las principales conclusiones de este estudio, respecto a la evaluación de la vulnerabilidad fueron:



- ✓ Debido al carácter subjetivo de los métodos de índice y superposición, de ser posible y si la información con que se cuenta es confiable (en cantidad y calidad), se recomienda la construcción de modelos de simulación para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación. Mediante la aplicación de modelos de simulación se reduce el grado de incertidumbre lo que, a su vez, permite mayor certeza para la toma de decisiones.
- ✓ No es posible desde esta investigación descartar ó reprobar alguno de los métodos de índice y superposición ó recomendar ciegamente la aplicación del modelo de simulación utilizado, ya que en cualquiera de los casos es aún más confiable validar con información tomada en campo.
- ✓ Finalmente se encontró que los métodos de índice y superposición aciertan en la inclusión de la permeabilidad de los estratos no saturados y la profundidad del nivel freático. Sin embargo, no incluyen un parámetro muy importante en la definición de la vulnerabilidad y es el contenido de humedad del suelo que puede acelerar retardar el acceso y tránsito del contaminante hasta el acuífero.

**Vulnerabilidad de los acuíferos en el Bajo Cauca Antioqueño** (Aplicación y Análisis comparativo entre metodologías de Evaluación de Vulnerabilidad de Acuíferos y Confrontación con Parámetros de calidad del agua subterránea en el Bajo cauca Antioqueño. Gallo O.M.). En este estudio se usaron y compraron diez metodologías, de las cuales se presentan a continuación las conclusiones obtenidos con los métodos DRASTIC, DRATIC-P, SINTACS y GOD, Figuras 15, 16 y 17.

Para validar los resultados de las diferentes metodologías, se confrontan con los mapas de calidad de agua subterránea, como nitrato e índice de calidad del agua, presentados en la Figura 18. Debido a que las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas en la región del Bajo Cauca Antioqueño rara vez superan el límite de 10 N-NO<sub>3</sub> mg/l, este criterio sirvió para las vulnerabilidades más suaves, es decir las propuestas por GOD.

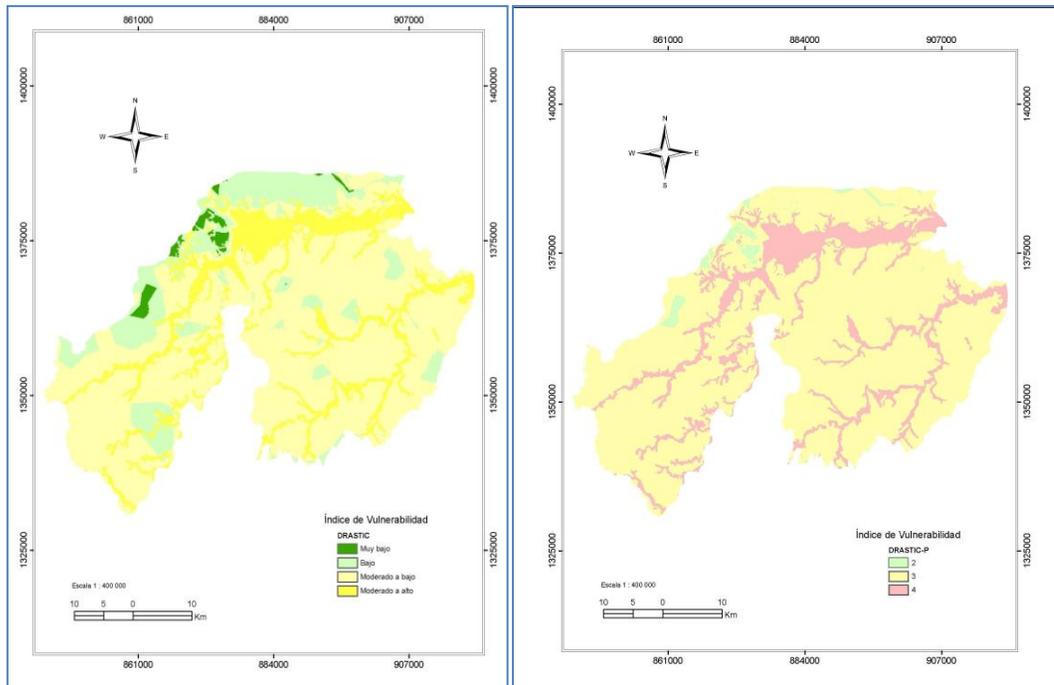


Figura 15. Vulnerabilidad Método DRASTIC & DRASTIC-P.

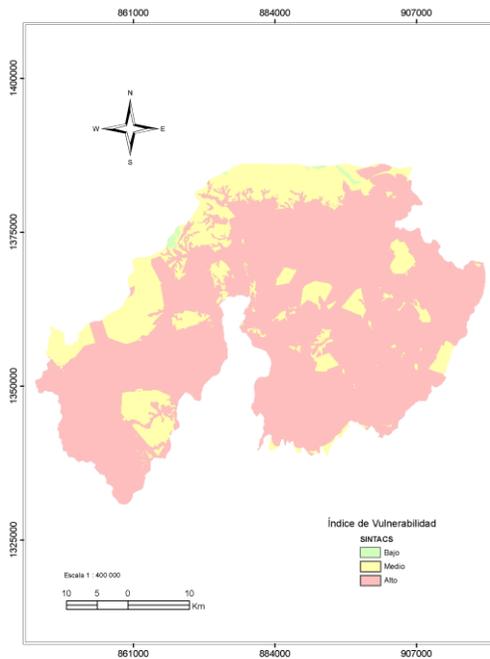


Figura 16. Vulnerabilidad Método SINTACS.

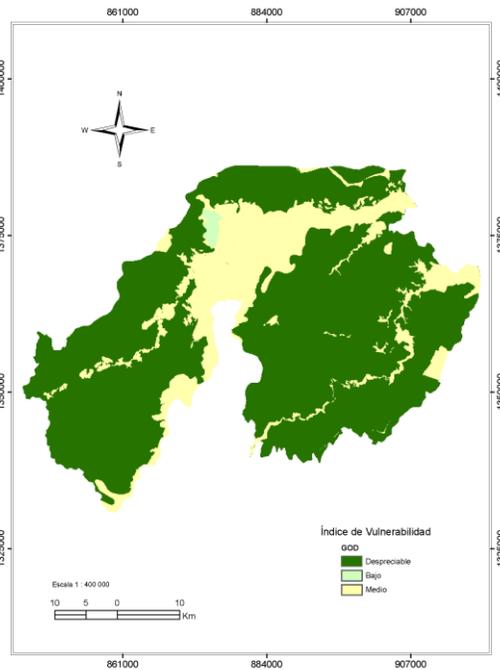


Figura 17. Vulnerabilidad Método GOD

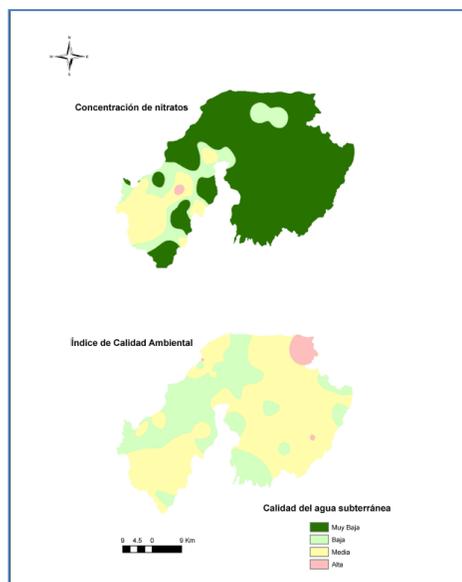


Figura 17. Distribución de la concentración de Nitratos e Índice de Calidad

Las principales conclusiones respecto a la evaluación de la vulnerabilidad fueron:

- ✓ Los rangos de calificación de la calidad del agua aplicados en el mapa del Índice de Calidad Ambiental (mala, aceptable, buena –entre baja y alta), al ser comparados con los mapas de vulnerabilidad reportan coincidencias por encima del 50% del área total con las metodologías DRASTIC-P y, DRASTIC I, las mismas que entre sí registran la relación más estrecha en clases de vulnerabilidad.
- ✓ Los resultados logrados por el grupo de metodologías DRASTIC, y DRASTIC-P son adecuados para las características de la zona y, teniendo en cuenta las condiciones rurales de más del 90% del territorio, el método de vulnerabilidad específica DRASTIC-P es el más apropiado. Igualmente, no se propone una metodología alternativa o adicional para evaluar la vulnerabilidad.
- ✓ La validación de los mapas de vulnerabilidad utilizando como instrumentos la comparación entre las metodologías y la confrontación entre el mapeo y la calidad del agua subterránea, permiten seleccionar la metodología más representativa frente a las condiciones hidrogeológicas de una zona de estudio.

**Mapa de Vulnerabilidad a los agroquímicos por el Método Drastic (CORPOURABÁ, 2010).** En la zona bananera de Urabá la principal actividad económica es la agricultura, motivo por el cual CORPOURABA elaboró el Mapa de Vulnerabilidad a los agroquímicos por el Método DRASTIC y DRASTIC-P (ver Figura 19). Se concluye que no se encuentra diferencias en la evaluación de la vulnerabilidad por estas dos metodologías

Con el fin de validar los resultados de vulnerabilidad obtenida se compararon las concentraciones de agroquímicos y se observa que las aguas subterráneas con mayores concentraciones se encuentran tanto en los sectores donde el acuífero tiene vulnerabilidad baja y vulnerabilidad media, Figura .19.

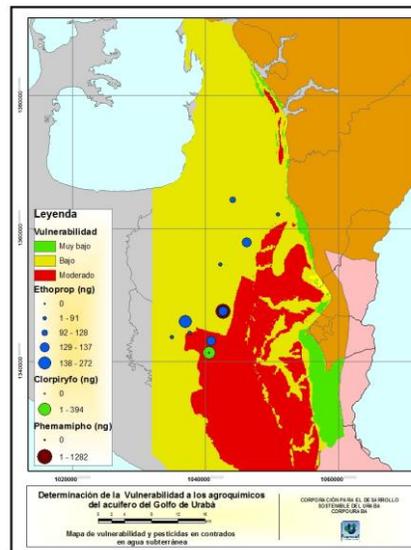


Figura 18. Mapa de Vulnerabilidad a los agroquímicos por el Método DRASTIC<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> CORPOURABÁ, 2010.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación se define como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente por una carga contaminante, entendiendo que la carga contaminante es una amenaza, que la vulnerabilidad intrínseca es independiente de la intensidad y aplicación de esta carga y que el bien a proteger es el agua subterránea.

El mayor problema en la aplicación de cualquiera de las metodologías expuestas en esta la guía, es la “incertidumbre” de la valoración de la contribución real de cada uno de los factores o parámetros; incertidumbre que se debe a la validez de las metodologías, debido principalmente a la escasa experiencia en la validación y verificación a nivel mundial. Adicionalmente la evaluación de la vulnerabilidad presenta siempre un componente de subjetividad que puede acentuarse en la medida que haya que asumir los valores de algunos los parámetros.

No existe una única metodología recomendable para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, debido a que se pueden obtener diferentes resultados para un mismo acuífero, con un mismo nivel de información, requiriéndose por lo tanto la evaluación, modificación y validación de los resultados obtenidos con base en el conocimiento de la zona y en los parámetros químicos indicadores de contaminación.

Se recomienda utilizar varias metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación. La selección las metodologías a utilizar dependerá de la información disponible y los resultados obtenidos deberán validarse con los resultados analíticos de los indicadores de contaminación de la cargas potenciales de contaminación, con el conocimiento de la zona, o con la modelación de los tiempos de viaje de las partículas.

La cartografía de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones de las Autoridades Ambientales y Entes Territoriales, con el objeto de conservar y proteger los recursos hídricos subterráneos.

La cartografía de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación debe hacer parte de los Planes de Manejo de Acuífero, de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas-POMCAS, y de los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, con el fin de restringir o permitir los vertimientos potencialmente contaminantes o determinados usos del suelo, que representen una amenaza para la calidad natural de las aguas subterráneas

La utilidad de los mapas vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación estará limitada por la escala de evaluación. Estos mapas serán orientativos cuando su nivel de evaluación es a escala nacional o regional (escalas menores 1:100.000) y para administración o manejo (toma de decisiones) cuando son evaluados a escala semidetallada o detallada (escalas mayores a 1:50.000).

Se recomienda utilizar los colores estándar para el mapeo de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, propuestos en la Leyenda Estándar Hidrogeológica Internacional (1995).

## BIBLIOGRAFIA

1. **Vrba, J. y Zaporozec, A.**: Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), 1994.
2. **CVC**. *Reglamentación para la Gestión de las Aguas Subterráneas en el Departamento del Valle del Cauca. Propuesta de Actualización Acuerdo CVC No 042 de 2010.*
3. **Emilio Custodio, Ramón Llamas**. *Hidrología Subterránea*. [ed.] Omega. 1994. Vol. II.
4. **Margat, J.** 1968.
5. **Banco Mundial**. *Parte B: Guía Técnica –Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea*. 2003.
6. **Stephen Foster, Ricardo Hirata**. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. s.l. : Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988.
7. **Aller, L., y otros**. *DRASTIC: A standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Ada. Oklahoma : U.S. Environmental Protection Agency, 1985.
8. *Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian" combined" approach*. **Civita, Massimo y Maio, Marina de**. 1990.
9. *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. **N. Doerfliger, P. -Y. Jeannin and F. Zwahlen**. s.l. : Environmental Geology, 1997, Vol. 39 (2).
10. **Banco mundial**. *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y autoridades ambientales*. 2003.
11. **PHI-UNESCO**. Programa Hidrológico Internacional (PHI) - UNESCO . *Guía para Educación Básica sobre Protección de Aguas Subterráneas*. [En línea] 2010. <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/guiasubterranee/principal/inicio.htm>.
12. *Assessing Aquifer Vulnerability to Sea-water intrusion using GALDIT Method: Part 2 –GALDIT Indicators Description*. **A. G. Chachadi, Joao Paulo Lobo Ferreira**.
13. **INGEOMINAS**. *Leyenda de Vulnerabilidad*. 2003.
14. **Hernández, Lina Gabriela**. *Generación de los Índices de Vulnerabilidad para acuíferos. Comparación de Métodos*. México : CEA-ITESM.
15. **Orfely, María Gallo**. *Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y confrontación con parámetros de calidad del agua subterránea en el bajo Cauca Antioqueño*. s.l. : Universidad de Antioquia, 2006.
16. **Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos**. *Manual para la Aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*. Santiago : s.n., 2004. Decreto Supremo No 46 de 2002.
17. **Diputación de Alicante**. *Memoria del Mapa de Vulnerabilidad de los Acuíferos a la contaminación. Provincia de Alicante. Método DRASTIC. Escala 1:500.00*. 2004.



18. **Auge, Miguel.** *Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos.* Buenos Aires : s.n., 2004.
19. **Instituto Geológico y Minero de España.** *Protección de las aguas Subterráneas frente a vertidos directos e indirectos.* s.l. : Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
20. *Volumen 1 No. 7. Indian Journal of Science and Technology.* Diciembre 2008, Indian Journal of Science and Technology.
21. **Stephen Foster, Ricardo Hirata, Daniel Gomes, Mónica Délia, Marta Paris.** *Protección de la Calidad del Agua Subterránea.* s.l. : Banco Mundial, 2003.
22. **Vargas, M.C.** *Memoria Técnica del Mapa de Aguas Subterráneas del Departamento de Sucre en escala 1:250.000.* . 2002.
23. **Corpouraba.** *Mapa de Vulnerabilidad a los Agroquímicos por el Método DRASTIC.* s.l. : Corpouraba, 2010.
24. **Rojas, Liliana y Vélez, María Victoria.** *Estimación de la vulnerabilidad a la contaminación en el sur del Valle del Cauca, Análisis de Metodologías.* s.l. : Universidad Nacional sede Medellín, 2008.