

## **Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos.**

***Rosa María Valcarce Ortega. CUJAE, Calle 114 entre 119 y 127, Marianao,***

***Telef: 260 2980. E-mail:rosy@tesla.cujae.edu.cu***

***Willy Rodríguez Miranda. CUJAE, Calle 114 entre 119 y 127, Marianao.***

***Telef: 2600151. E-mail: willy@civil.cujae.edu.cu***

### **RESUMEN**

La cartografía de vulnerabilidad de acuíferos, es una de las vías más adecuadas para preservar la calidad de las aguas subterráneas. Ella posibilita diferenciar las características naturales del terreno para proteger al acuífero de la acción de múltiples contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie, asociados a fenómenos naturales o a la actividad del hombre.

En regiones tropicales, las aguas subterráneas ocupan un papel fundamental en el abasto a la población, a la agricultura y la industria. Particularmente en Cuba estos recursos presentan singular importancia y se encuentran desarrollados en acuíferos carbonatados cársicos de extremadamente alta vulnerabilidad a impactos naturales y antropogénicos.

El trabajo que se presenta evalúa la vulnerabilidad natural de los acuíferos cubanos a través de una nueva metodología que calcula un índice de vulnerabilidad que ha sido denominado **PATHS**. Este índice es obtenido a partir del análisis de: **P**recipitaciones, Medio **A**cuífero (Profundidad del Nivel Freático, Litología del acuífero), **T**opografía (Pendiente del terreno), Resistividad **H**idráulica del **S**uelo. Toda la información fue procesada empleando un Sistema de Información Geográfico y como resultado final se ha obtenido un Mapa de Vulnerabilidad para los acuíferos de Cuba a escala 1:250 000, que constituye punto de partida para:

- ✓ decidir sobre investigaciones y redes de monitoreo a escalas más detalladas.
- ✓ dictar políticas de control a las actividades agrícolas, industriales y urbanas.

- ✓ evaluar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

## **INTRODUCCIÓN**

Sólo aproximadamente el 3% del agua disponible en la Tierra es agua dulce. Del agua dulce el 79% está en los casquetes polares y sólo el 21% representa los recursos hídricos aprovechables, de los cuales el 20% es agua subterránea y el 1% es agua superficial ([www.infoagua.org](http://www.infoagua.org)).

En el mundo existen al menos 1 500 millones de personas para quienes las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de agua dulce. Sin embargo, en muchas regiones la sobreexplotación y la contaminación están amenazando estas fuentes de abasto.

En Cuba, las aguas subterráneas ocupan el 31% del volumen total del agua que se consume anualmente para satisfacer necesidades de la actividad económica y social (CITMA, 2001). Estas estadísticas reflejan la importancia de proteger este recurso vital.

En los últimos años ha sido creciente la preocupación de la sociedad ante la degradación de la calidad de los recursos hídricos subterráneos. Cada vez existe mayor conciencia sobre la necesidad de desarrollar una gestión ambientalmente segura de las aguas subterráneas. Como resultado de esta situación, actualmente se generaliza el uso de técnicas para cartografiar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, como una herramienta de gran utilidad para compatibilizar la carga contaminante generada por actividades antrópicas y la capacidad del medio acuífero para soportar la misma sin perjuicio de la calidad del agua subterránea.

## **VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS.**

El término **vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación**, fue introducido por el hidrogeólogo francés J. Margat a finales de la década del 60 (Margat, 1968), basado en el hecho real de que, en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie.

El objetivo principal de un mapa de vulnerabilidad, es la subdivisión del área en diferentes unidades homogéneas, a veces llamadas celdas o polígonos, que tienen diferentes niveles de vulnerabilidad. Sin embargo, esta diferenciación entre las celdas, solo muestra la vulnerabilidad relativa de unas áreas con respecto a otras, no representan valores absolutos.

Antes de intentar construir un mapa de vulnerabilidad, debe ser cuidadosamente definido y analizado el término **vulnerabilidad del agua subterránea**. En este trabajo se considera que vulnerabilidad es una **propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de su sensibilidad a impactos naturales y/o antropogénicos** (Vrba y Zaporozec, 1994).

No obstante, debe destacarse que se distingue más de un tipo de vulnerabilidad del agua subterránea. El concepto anterior se refiere a la **vulnerabilidad intrínseca o natural**, la cual es una función de las características hidrogeológicas del acuífero, de los suelos y materiales geológicos que lo cubren. Además de estas propiedades intrínsecas, pueden ser considerados los efectos potenciales de determinados contaminantes, en detrimento (en espacio y tiempo), del uso presente y futuro de las aguas subterráneas.

O sea, científicamente es más coherente evaluar la vulnerabilidad a cada clase de contaminantes, (nutrientes, patógenos, metales pesados, etc) o a cada grupo de actividades contaminantes (agrícolas, industriales, etc), pero en general, no existe información suficiente para alcanzar este ideal. Por otra parte, ello obligaría a consultar un atlas de vulnerabilidad para cada zona, lo cual podría no tener mucho uso práctico. Es por ello que a nivel mundial han tenido gran desarrollo los sistemas de clasificación de vulnerabilidad de acuíferos, que evalúan la llamada **vulnerabilidad intrínseca, natural o integrada**.

Se han desarrollado diferentes técnicas para evaluar la vulnerabilidad natural de acuíferos. Las más conocidas son: DRASTIC (Aller et al 1987), GOD (Foster & Hirata 1988), SINTACS (Civita, 1990), AVI (Van Stempvoort, 1994).

DRASTIC, SINTACS y GOD, evalúan la vulnerabilidad del acuífero dividiendo el mismo en celdas o polígonos, para los cuales calculan un índice de vulnerabilidad a partir de

un sistema por rangos ponderados. O sea, estos métodos definen rangos para cada uno de los parámetros que emplean y además asignan un peso en función de la importancia relativa de dicho parámetro. La suma de estos rangos ponderados permite obtener un índice que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono del acuífero. A mayor valor de este índice, mayor es la sensibilidad del acuífero a la contaminación.

El método AVI calcula la resistencia hidráulica vertical total de las capas que sobreyacen al acuífero, dividiendo el espesor de cada capa entre su conductividad hidráulica vertical. La suma de estos cocientes es precisamente el índice AVI, el cual expresa la resistencia hidráulica que ofrece el medio que protege al acuífero y es inversamente proporcional a la vulnerabilidad del mismo.

En general puede destacarse que:

- 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.
- 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.
- AVI es una metodología sencilla pero que requiere conocer el espesor y la conductividad hidráulica vertical de las capas que sobreyacen al acuífero.

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen herramientas muy útiles y efectivas para la aplicación de estas metodologías y se reportan no pocos trabajos en la literatura internacional en este sentido (Taco y Galarrazaga, 2002)

### **TAREA TÉCNICA PLANTEADA.**

La tarea técnica planteada a esta investigación fue:

Obtener un mapa de vulnerabilidad de las principales cuencas subterráneas de Cuba, a escala 1:250 000, que constituya punto de partida para:

- Decidir sobre investigaciones y redes de monitoreo a escalas más detalladas.

- Dictar políticas de control a las actividades agrícolas, industriales y urbanas.
- Evaluar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

Esta tarea forma parte del Proyecto “Atlas de Peligros Múltiples de la República de Cuba, a Escala 1:250000 que desarrolla el Departamento de Geociencias de la CUJAE.

### **METODOLOGÍA DESARROLLADA.**

A partir de la revisión bibliográfica realizada y de la información geológica, edafológica, geomorfológica e hidrogeológica disponible, fue desarrollada una metodología que aplica un sistema por rangos ponderados para calcular un índice, que ha sido denominado PATHS, y que resulta directamente proporcional a la vulnerabilidad del acuífero. A continuación se explica detalladamente esta metodología destacándose la información disponible, el criterio de selección de las variables empleadas así como los pesos y rangos definidos para cada una de ellas.

#### **a) Información disponible.**

Para el desarrollo de la investigación se contó con la siguiente información digitalizada para todo el territorio nacional:

- Mapa del relieve topográfico Escala 1:250 000 (GEOCUBA, 2000)
- Mapa Hidrogeológico Escala 1:250 000 (Flores, et. al., 2000)
- Mapa de Suelos Escala 1:500 000 (Griset, 2000)
- Precipitación media anual (período 1995-2000). (Instituto de Meteorología, 2000)

#### **b) Variables empleadas.**

La figura 1 refleja las variables empleadas en el cálculo del índice PATHS.

**Figura 1: Variables empleadas en el cálculo del índice PATHS.**

<b>P:</b>	<b>Profundidad del agua, Precipitaciones</b>
<b>A:</b>	<b>Litología del Acuífero</b>
<b>T:</b>	<b>Tectónica, Pendiente Topográfica.</b>
<b>H</b> <b>S</b>	<b>Resistencia Hidráulica del Suelo</b>

**c) Asignación de pesos y rangos a cada una de las variables.**

✓ **Profundidad del agua (P)**

**Criterio de selección:** Mientras más profundo se encuentre el nivel estático, mayor es el espesor de la zona no saturada y su capacidad de atenuar la carga contaminante.

**Peso asignado: 5**

Profundidad del agua (en metros)	Rango
0 – 20	10
20-30	6
>30	1

Tabla 1: División por rangos para la profundidad del agua subterránea.

Debido a la escala de los mapas disponibles, no fue posible detallar más la variabilidad de la profundidad del agua subterránea sin incurrir en errores. En trabajos futuros este es un aspecto que debe ser considerado al ser un parámetro de gran importancia para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación.

✓ **Precipitaciones (Pp)**

**Criterio de selección:** Altos niveles de precipitación pueden aminorar el impacto del agente contaminante, ya sea diluyéndolo o transportándolo en forma de flujo superficial, disminuyendo la vulnerabilidad del acuífero.

**Peso asignado: 4**

Precipitaciones (mm)	Rango
< 1000	10
1000 - 1200	9
1200 - 1400	8
1400 - 1600	7
1600 - 1800	5
> 1800	4

Tabla 2: División por rangos para las precipitaciones

✓ **Litología del acuífero (Lit)**

**Criterio de selección:** Los fenómenos de difusión y de dispersión de los agentes contaminantes dependen de la granulometría, textura, fraccionamiento, porosidad, permeabilidad, etc, de las rocas. Ello también influye en el desarrollo de reacciones químicas entre el agua contaminada y la matriz del acuífero. Las rocas que poseen mayor transmisividad hidráulica hacen más vulnerable al acuífero.

**Peso asignado: 3**

Litologías	Rango
carbonatadas, carbonatadas metamórficas, carbonatadas clásticas, clásticas, humedales.	10
carbonatadas terrígenas	8
terrígenas, terrígenas carbonatadas	6
ultra básicas	3
evaporitas, metamórficas, vulcanógenas	1

Tabla 3: División por rangos para las litologías.

✓ **Tectónica (T)**

**Criterio de selección:** La presencia de fallas en el medio geológico, favorece el desarrollo de fracturas y ello puede provocar el incremento de la porosidad secundaria y de la permeabilidad de las rocas, disminuyendo la capacidad de atenuación de la zona no saturada.

**Peso asignado:** 1

Presencia de Fallas	Rango
Zonas con presencia de fallas	5
Zonas sin presencia de fallas	0

Tabla 4: División por rangos para la tectónica.

✓ **Pendiente Topográfica (PendTop)**

**Criterio de selección:** Pendientes elevadas de la superficie del terreno favorecen la escorrentía superficial y hacen que disminuya la infiltración de los contaminantes.

**Peso asignado:** 1

Pendiente Topográfica (%)	Rango
< 1	10
1 - 3	9
3 - 7	5
7 - 10	3
> 10	1

Tabla 5: División por rangos para la pendiente topográfica.

✓ **Resistencia Hidráulica del Suelo (RH)**

**Criterio de selección:** Este parámetro cuantifica la resistencia que hace el suelo a la infiltración de un contaminante expresando la inaccesibilidad hidráulica al acuífero.

En el mapa de suelos disponible se presenta el espesor de suelos en rangos del 1 al 6 donde:

- 1: suelos con espesores mayores de 100 cm.
- 2: suelos con espesores entre 61 y 100 cm.
- 3: suelos con espesores entre 41 y 60 cm.
- 4: suelos con espesores entre 21 y 40 cm.
- 5: suelos con espesores entre 11 y 20 cm.
- 6: suelos con espesores menores de 10 cm.

Y el drenaje se presenta en rangos del 1 al 5 definiendo:

- 1: suelos excesivamente drenados.
- 2: suelos bien drenados.
- 3: suelos drenados.
- 4: suelos mal drenados.
- 5: suelos muy mal drenados.

La resistencia hidráulica del suelo fue evaluada dividiendo el espesor de suelo entre el drenaje, de forma similar a como establece la metodología AVI. De esta manera fue posible caracterizar al menos cualitativamente la resistencia hidráulica de los suelos a la infiltración de contaminantes. A continuación se especifica el peso asignado a este parámetro y su división por rangos.

**Peso asignado: 5**

<b>Resistencia Hidráulica del Suelo</b>	<b>Rango</b>
<b>2 - 6</b>	<b>10</b>
<b>1 - 2</b>	<b>6</b>
<b>0.6 - 1</b>	<b>3</b>
<b>0.2 - 0.6</b>	<b>1</b>

Tabla 6: División por rangos para la resistencia hidráulica del suelo.

Finalmente, el índice PATHS fue calculado como:

$$PATHS = 5P + 4Pp + 3Lit + T + PendTop + 5RH$$

Analizando la variabilidad del índice PATHS, la vulnerabilidad en cada celda fue clasificada como:

<b>PATHS</b>	<b>Vulnerabilidad</b>
<b>&lt; 100</b>	<b>Baja</b>
<b>100 - 120</b>	<b>Moderada</b>
<b>120 - 140</b>	<b>Alta</b>
<b>&gt; 140</b>	<b>Extrema</b>

Tabla 7: Evaluación de la vulnerabilidad según el índice PATHS.

#### **d) Empleo del Sistema de Información Geográfica**

Toda la información fue representada en un sistema de información geográfico y el procesamiento de la misma fue realizado haciendo uso de las ventajas de este sistema.

Fueron creados los mapas temáticos en formato raster, de: profundidad del nivel freático, precipitación media anual para el período 1995 – 2000, litología del acuífero, zonas con presencia de fallas, pendiente topográfica y resistencia hidráulica de los suelos. Cada uno de estos mapas fue reclasificado según los rangos ya explicados y fueron además ponderados con sus pesos correspondientes. Finalmente se procedió a sumar estos mapas temáticos para calcular el índice PATHS.

## **RESULTADOS OBTENIDOS.**

La figura 2 presenta el Mapa de Vulnerabilidad de Acuíferos obtenido para el territorio nacional a través del cálculo e interpretación del índice PATHS.

Se destaca que las zonas más vulnerables se localizan fundamentalmente en las llanuras cársticas donde el desarrollo de los suelos es escaso, la profundidad del nivel freático es pequeña, la litología del acuífero está representada fundamentalmente por calizas miocénicas carsificadas que favorecen la infiltración y migración de los contaminantes, y donde el relieve topográfico no favorece el predominio de la escorrentía superficial.

En general se destaca también que las áreas menos vulnerables se localizan fundamentalmente en los principales macizos montañosos del país, lo que obedece principalmente a la composición litológica en estas zonas y a las elevadas pendientes topográficas que favorecen la escorrentía superficial.

## **CONCLUSIONES**

Se ha presentado una aplicación SIG para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos en todo el territorio nacional a escala 1:250000, que tiene gran valor desde el punto de vista metodológico y práctico.

Metodológicamente esta aplicación demuestra la posibilidad de confeccionar mapas como éste a escalas más detalladas siempre y cuando se cuente con la información necesaria. Al mismo tiempo se demuestra las facilidades que brinda un sistema de información geográfica para resolver esta tarea.

Desde el punto de vista práctico, el resultado obtenido constituye punto de partida para:

- ✓ evaluar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.
- ✓ dictar políticas de control a las actividades agrícolas e industriales.
- ✓ decidir sobre investigaciones y redes de monitoreo a escalas más detalladas.

## **RECOMENDACIONES.**

Desarrollar estudios de vulnerabilidad de acuíferos a escalas mas detalladas (1:100000 a 1:25000 y mayores), con el objetivo de brindar una poderosa herramienta para la adecuada toma de decisiones sobre uso del suelo y para el diseño de programas de protección de las aguas subterráneas.

## **BIBLIOGRAFIA.**

**Aller, L., T. Bennet, J. Lehr, Petty, R., y G. Hackett, 1987:** DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. National Water Well Association. Dublin Ohio. EPA, Oklahoma. USA, EPA-600/2-87-035.

**CITMA, 2001:** Situación ambiental cubana 2001. ISBN 959 246 039 6. Ciudad de La Habana, Cuba.

**Civita, M., 1990:** Assesment of aquifer vulnerability to contamination. "Protezione e Gestione delle Acque Sotteranee Metodologie, Technologie e Obbietivi". Marano sul Panaro, v-3, p. 39-86

**Foster, S y R. Hirata, (1988):** Determinación de riesgos de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS, Lima, Perú.

**GEOCUBA, 2000: Mapa del relieve topográfico de Cuba a escala 1:250000**

**Griset, J., J. A, A. Hernández, J. Rosario, N. Ferrer, et. Al. 2000:** Suelos 500000. Una aplicación SIG para los servicios técnicos, la investigación y la docencia especializada. Memorias de Geomática 2002. Ciudad de La Habana, Cuba.

**Intituto de Meteorología, 2000:** Datos de Precipitaciones en cuba período 1995 2000, [www.met.in.cu](http://www.met.in.cu)

**Margat, J., 1968:** Groundwater vulnerability to tamination. BRGM, 68 sgl 198, HYD, Orleans, France.

**Taco, G. Y R. Galarrazaga (2002):** Aportación de los sistemas de información geográficos a la protección de acuíferos. Uso de un sistema de información geográfico para determinar la vulnerabilidad de un acuífero

andino de origen volcánico. Escuela Politécnica Nacional, Dpto de Cicias del Agua, Quito, Ecuador.

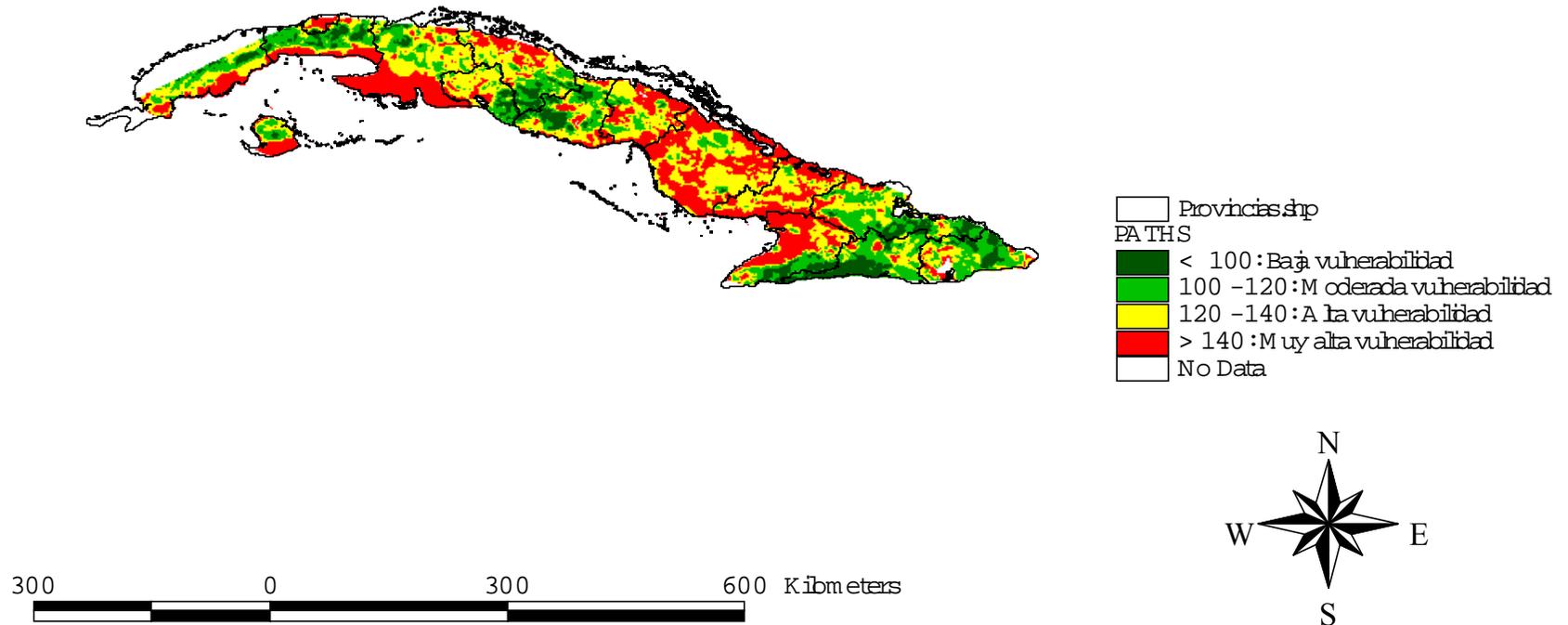
**Van Stempvoort, D. Ewert, L. Wassenaarl, 1994:** AVI: A method for groundwater protection maping in the Prairie, Provinces of Canada. Saskatchewan.

**Vrba y Zaparozec, 1994:** Guidbook on Mapping Groundwater Vulnerability International Association of Hydrogeologists. Vol. 16. ISBN 3-922705-97-9

**[www.infoagua.org](http://www.infoagua.org)**



# Resultados



**Figura 2 Mapa de vulnerabilidad de acuíferos cubanos según índice PATHS.**