

# **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica**

**Por**

**Jonathan Agüero Valverde**

**Rosendo Pujol Mesalles**

Presentado en la VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía. 20-22 setiembre, 2000

## **Resumen**

Actualmente más del 50% del agua potable con que se abastece el Área Metropolitana proviene de las formaciones acuíferas del Valle Central. Ésta es de excelente calidad, pero los acuíferos pueden sufrir contaminación por la intensa actividad humana que se desarrolla sobre ellos.

El área de estudio comprende parte de los cantones de Santo Domingo, Heredia, San Isidro y el cantón de San Pablo, todos de la provincia de Heredia. Esta área es importante porque se encuentra dentro de la zona de captación de pozos definida por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y está sujeta a una fuerte urbanización.

Este trabajo incluye análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos por medio de dos métodos: DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y GOD (Foster, 1987). Estos métodos son internacionalmente reconocidos y buscan establecer la capacidad de atenuación de contaminantes por eliminación, retardación y dilución, para cargas impuestas en la superficie.

El método GOD es un modelo de vulnerabilidad multiplicativo, que toma en cuenta las variables de profundidad del agua, substrato litológico y nivel de confinamiento del acuífero. Los valores de las variables van de cero a uno, por lo tanto el índice GOD varía también en este rango. El método DRASTIC es un modelo de vulnerabilidad relativa de tipo sumativo, con diferentes factores de ponderación para cada una de las variables. Existen dos tipos de Índice DRASTIC según el tipo de contaminante: el Pesticida y el no Pesticida. Las variables tomadas en cuenta por el método son profundidad del agua, recarga neta, tipo de acuífero, tipo de suelo, pendiente del terreno, impacto en la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero.

Utilizando los Sistemas de Información Geográfica Arc/Info y ArcView se generó el Modelo de Elevación Digital y las superficies freáticas de los acuíferos La Libertad, Colima Superior y Colima Inferior, a partir de la información de pozos obtenida en el SENARA.

Con estos modelos y otra información geológica se crearon las diferentes capas de información para cada una de las variables de los métodos.

De los resultados de ambos métodos se puede concluir que las áreas de mayor vulnerabilidad a la contaminación son pequeñas y se concentran en las cercanías de los cauces de los ríos Virilla y Tibás y al suroeste de Santo Domingo, en el poblado de Santa Rosa. De ahí que la interacción río-acuífero deba estudiarse con mayor detalle, para establecer si el Río Virilla alimenta en algún punto al acuífero Colima Superior y por lo tanto lo contamina.

### **Palabras Clave**

Vulnerabilidad; Contaminación de Acuíferos; GOD; DRASTIC; Sistemas de Información Geográfica; Superficies Freáticas; Modelos de Elevación Digital.

### **Introducción**

Nuestro país posee abundancia del recurso hídrico debido a su situación geográfica, que propicia una precipitación promedio de más de 3500mm al año. Como es bien sabido, parte de esta agua se convierte en escorrentía superficial (ríos, quebradas, etc.) y parte percola y pasa a formar la escorrentía subterránea. La red hidrográfica nacional es vasta y por mucho tiempo a sido utilizada para la producción de energía hidroeléctrica y abastecimiento de agua potable. Sin embargo el alto grado de contaminación de algunos ríos, sobre todo en el Valle Central, hace cada vez más difícil y costoso utilizarlos para abastecer agua potable.

Por lo anteriormente expuesto en el Área Metropolitana se está explotando el agua de acuíferos, tanto mediante la perforación de pozos como por medio de manantiales. Hoy en día estas fuentes proveen cerca del 50% del agua potable de la Gran Área Metropolitana (ProDUS, 1998).

Para asegurarnos la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo es necesaria una adecuada protección. Conociendo las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación pueden establecerse en ellas programas específicos de inspección y monitoreo sobre posibles fuentes de contaminación.

La vulnerabilidad a la contaminación es una característica de los acuíferos difícil de determinar y depende de la interacción entre diferentes factores, como profundidad del nivel freático o techo del acuífero, la capacidad de atenuación de las capas litológicas sobrepuestas al acuífero, la tasa de recarga y otros factores. Alrededor del mundo se han propuesto diferentes modelos para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Estos son modelos matemáticos y hacen uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar los mapas de vulnerabilidad y de esta forma, tomando en cuenta la amenaza, estimar el riesgo de contaminación. Estos mapas forman parte de un conjunto mayor de información, necesaria para el manejo racional de los recursos hídricos, tomando en cuenta tanto la administración como la protección de dicho recurso.

Alrededor del mundo se han llevado a cabo muchos análisis de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica. Mapas de vulnerabilidad se han desarrollado a diferentes escalas y en diferentes países y regiones, entre los cuales se puede citar EUA, Canadá, Portugal, Sudáfrica y otros.

Existen muy diversos métodos de determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Internacionalmente son utilizados los métodos DRASTIC, GOD y SINTACS entre otros. Estos métodos buscan determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables.

### **Riesgo, vulnerabilidad y amenaza**

En los campos de la hidrología y la geología, el riesgo suele definirse como (Civita y De Maio, 1999):

$$R = H_t D \text{ ec. 2.2}$$

Donde  $H_t$  es la probabilidad asociada al periodo de retorno del evento y  $D$  es el daño posible.

Otros autores asocian la definición de riesgo al desempeño de un sistema. Hashimoto *et al.* (1980) determinan el desempeño del sistema enfocando la falla y asociado a tres conceptos útiles para medir el desempeño, que son:

1. **confiabilidad:** medida de cuan propenso es el sistema a fallar.
2. **resiliencia:** cuan rápido retorna el sistema a un estado satisfactorio una vez ocurrida la falla.
3. **vulnerabilidad:** cuan severas son las consecuencias de la falla en el sistema.

Este concepto de vulnerabilidad puede ser asociado a vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas, si se sustituye "falla del sistema" por "carga contaminante". Por supuesto la severidad de las consecuencias se mide en términos del deterioro de la calidad del agua.

Específicamente en el caso de riesgo a la contaminación de un acuífero Foster (1991) lo define como la interacción entre:

- a. La carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada subsuelo como resultado de una actividad humana.
- b. La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, debido a las características naturales de los substratos que lo separan de la superficie.

Debe tenerse claro que el riesgo de contaminación es entendido como la probabilidad de que las aguas subterráneas alcancen niveles de químicos, bacterias, virus, etc. por encima de los cuales peligra la salud humana. Organismos internacionales como la OMS y la EPA

recomiendan valores máximos permisibles y en el país existe regulación con respecto a los valores permisibles en agua potable.

La vulnerabilidad por su parte puede entenderse como la sensibilidad en la calidad del agua subterránea ante una carga contaminante impuesta, la cual es determinada por las características intrínsecas del acuífero. Por lo tanto la vulnerabilidad es inversa a la capacidad de atenuación de contaminantes del acuífero.

En el ámbito de las aguas subterráneas el riesgo de contaminación esta formado por la interacción de dos partes:

- la pasiva, representada por la vulnerabilidad, que no depende de la actividad humana y no cambia perceptiblemente con el tiempo.
- la activa, representada por la amenaza, que depende directamente de la actividad humana en la superficie o subsuperficie y puede cambiar con el tiempo.

Este concepto es equivalente a la definición de Foster de riesgo de contaminación de un acuífero. Sin embargo se debe ser cuidadoso con la definición de activo y pasivo. La actividad humana puede cambiar características "intrínsecas" del acuífero, como la capacidad de atenuación de las capas sobre el acuífero, el mecanismo de recarga y el espesor de suelo. La amenaza por su parte tampoco es siempre activa. En el sentido estricto de la palabra una ciudad puede cambiar, pero difícilmente dejará de ser ciudad, por lo tanto la amenaza no desaparecerá, por el contrario, normalmente aumentará con el aumento en el tamaño de la ciudad.

### **Metodologías para la determinación de la vulnerabilidad**

Existen muy variadas metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Esencialmente coinciden en la determinación de la vulnerabilidad debido a las características intrínsecas del medio, por lo que algunas metodologías la denominan vulnerabilidad intrínseca. Algunos otros métodos como el de Factores de Atenuación están íntimamente relacionados con el tipo de contaminante y resultan más complejos. A continuación se describen algunos de los métodos más conocidos.

#### **Método GOD**

El método de GOD fue desarrollado en 1987 por Foster, y trata de ser simple y sistemático. Éste se considera el primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades. El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster e Hirata, 1991).

Es claro que se trata de un método empírico que establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación, factores que poseen relaciones complejas que dependen de gran cantidad de variables difíciles sino imposibles de cuantificar. Para solventar este inconveniente la metodología utiliza la clasificación de tres facetas discretas que son:

- Distancia del agua
- Ocurrencia del agua subterránea
- Substrato litológico

La vulnerabilidad según el método se calcula como el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G*O*D \text{ ec. 2.11}$$

Donde G = índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence)

O = índice del substrato litológico en términos de grado de consolidación y características litológicas (Overall aquifer class).

D = índice por profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado (Depth).

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición (fig. II-8). Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

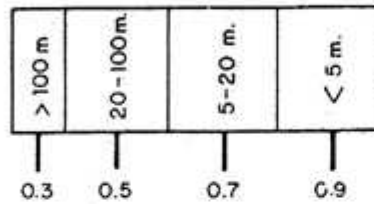
Algunos otros factores reconocidos como modificadores de la vulnerabilidad son tomados en cuenta por el método dentro de la carga contaminante. Entre estos se puede citar la infiltración efectiva y el tipo de suelo.

Otra característica del método importante de destacar es que solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero.

Se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si el valor está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7.

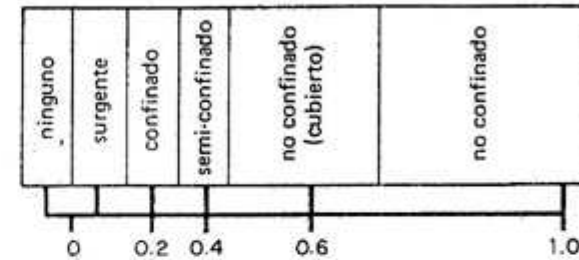
(a) DISTANCIA AL AGUA

PROFUNDIDAD DE LA NAPA FREATICA (acuifero no confinado) O TECHO DEL ACUIFERO (confinado)



(b) OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRANEA

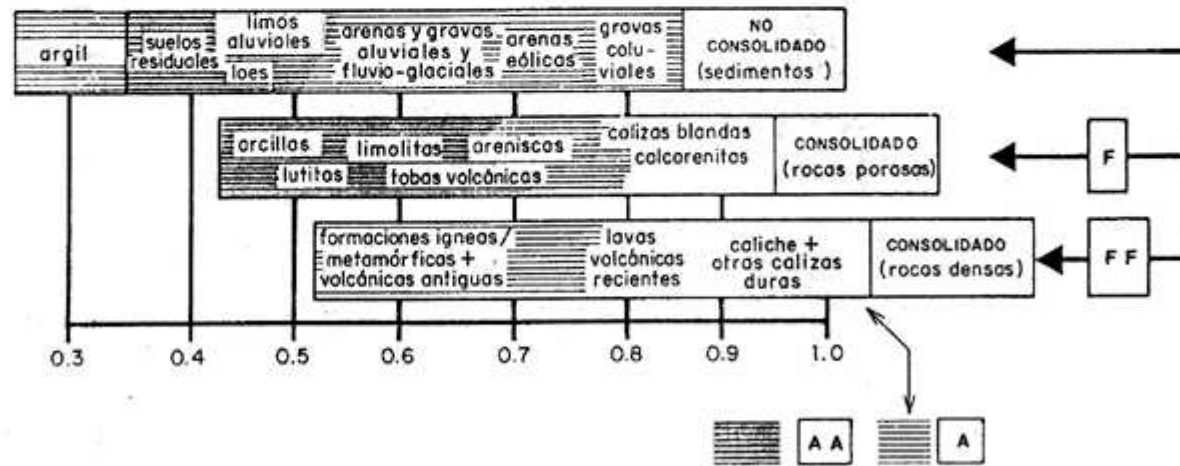
CONDICION DEL ACUIFERO



(c) SUBSTRATO LITOLOGICO

CARACTER DEL ACUIPERMO O ACUITARDO

- (i) GRADO DE CONSOLIDACION
- (ii) CARACTER LITOLOGICO
- F grado de fisuración
- A capacidad relativa de atenuación (contenido de arcilla)



CARACTERIZACION DE LOS COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO

Para cada componente, se indica un índice comparativo de peligrosidad creciente.

Figura 1 Caracterización de la vulnerabilidad GOD (Foster e Hirata, 1991)

## Método DRASTIC

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller *et al.* en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés. Estos factores son:

- Profundidad del agua subterránea (depth)
- Tasa de recarga (recharge)
- Tipo de acuífero (aquifer media)
- Tipo de suelo (soil media)
- Topografía
- Impacto en la zona no saturada
- Conductividad hidráulica

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

El índice DRASTIC es calculado con estos factores de la siguiente forma:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{Contaminación Potencial ec. 2.12}$$

Donde los subíndices r y w significan factor de clasificación y factor de ponderación respectivamente.

Este método provee una forma simple de asignar la susceptibilidad de ciertas áreas a la contaminación. Los factores de clasificación se establecen del 1 al 10, mientras los factores de ponderación varían según el factor implicado. Los factores más importantes son la profundidad del nivel de agua, el tipo de suelo y el impacto de la zona no saturada. Además los factores de ponderación cambian cuando se trata de agentes contaminantes pesticidas. Estas diferencias se deben a que los pesticidas resultan menos volátiles y más persistentes en el ambiente.

El cuadro 1 muestra los valores para cada factor

<i>Cuadro 1a Profundidad del agua (D)</i>	
Profundidad (m)*	Clasificación $D_r$
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
Tipo	Ponderación $D_w$
Pesticida	5
No pesticida	5

\*Los valores de profundidad originalmente establecidos en el método se encuentran en pies.

<i>Cuadro 1b Recarga Neta (R)</i>	
Recarga (mm)	Clasificación $R_r$
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9
Tipo	Ponderación $R_w$
Pesticida	4
No pesticida	4

<i>Cuadro 1c Medio acuífero (A)</i>		
Tipo de acuífero	Rango de clasificación $A_r$	Valor típico $A_r$
Lutita masiva	1 - 3	2
Metamórfica/Ignea	2 - 5	3
Metamórfica/Ignea meteorizada	3 - 5	4
Till glacial	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 karstica	9 - 10	10
Tipo	Ponderación $A_w$	
Pesticida	3	
No pesticida	3	

<i>Cuadro 1d Medio del suelo (S)</i>	
Tipo de suelo	Clasificación $S_r$
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
Tipo	Ponderación $S_w$
Pesticida	5
No pesticida	2

<i>Cuadro 1d Topografía (T)</i>	
Pendiente (%)	Clasificación $T_r$
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
> 18	1
Tipo	Ponderación $T_w$
Pesticida	3
No pesticida	1

<i>Cuadro 1e Impacto de la zona no Saturada (I)</i>		
Tipo de medio	Rango de clasificación $I_r$	Valor típico $I_r$
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
Arena y grava	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9

Caliza karstica	8 - 10	10
Tipo	Ponderación $I_w$	
Pesticida	4	
No pesticida	5	

<i>Cuadro 1f Conductividad Hidráulica (C)</i>		
Conductividad Hidráulica		Clasificación $C_r$
(m/día)	(cm/s)	
0.04 - 4.08	$4.6 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-3}$	1
4.08 - 12.22	$4.7 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-2}$	2
12.22 - 28.55	$1.4 \times 10^{-2} - 3.4 \times 10^{-2}$	3
28.52 - 40.75	$3.4 \times 10^{-2} - 4.7 \times 10^{-2}$	6
40.75 - 81.49	$4.7 \times 10^{-2} - 9.5 \times 10^{-2}$	8
> 81.49	$> 9.5 \times 10^{-2}$	10
Tipo		Ponderación $C_w$
Pesticida		2
No pesticida		3

### Descripción del sitio de estudio

La zona se ubica entre las coordenadas 522000 y 532000 de longitud; el Río Virilla y la coordenada 222000 de latitud en el sistema de coordenadas planas Costa Rica Lambert Norte. Se encuentra en las hojas cartográficas Santo Domingo, San Isidro, Burio, Uriche, Cubujuquí, Pavas y Torres en escala 1:10000 y entre las hojas Barva y Abra en escala 1:50000 editadas por el IGN.

En cuanto a la división política, el área está comprendida entre los cantones de Heredia, Santo Domingo, San Pablo, San Rafael y San Isidro, todos de la provincia de Heredia. También dentro de la zona existen pequeñas áreas del cantón de Barva. Solo el cantón de San Pablo (distrito único) se encuentra totalmente contenido en la zona de estudio.

El área estudiada alcanza los  $51.75 \text{ km}^2$  y posee una elevación promedio de 1185 msnm. La elevación mínima dentro del área de estudio es de 950 msnm, al suroeste, sobre el Río Virilla. La máxima elevación de 1350 msnm se da al noreste, cerca de San Isidro de

Heredia. La zona se encuentra irrigada por tres ríos importantes: el Río Virilla, el Río Bermúdez y el Río Tibás.

Desde el punto de vista de la topografía, el área presenta en su mayoría pendientes bajas. Más de la mitad de la zona posee pendientes menores al 10 % pero existe una zona de pendientes mayores al 30% producto de los cañones de los ríos ([ver Modelo de Elevación Digital, mapa 1](#)).

### **Determinación de la vulnerabilidad método GOD**

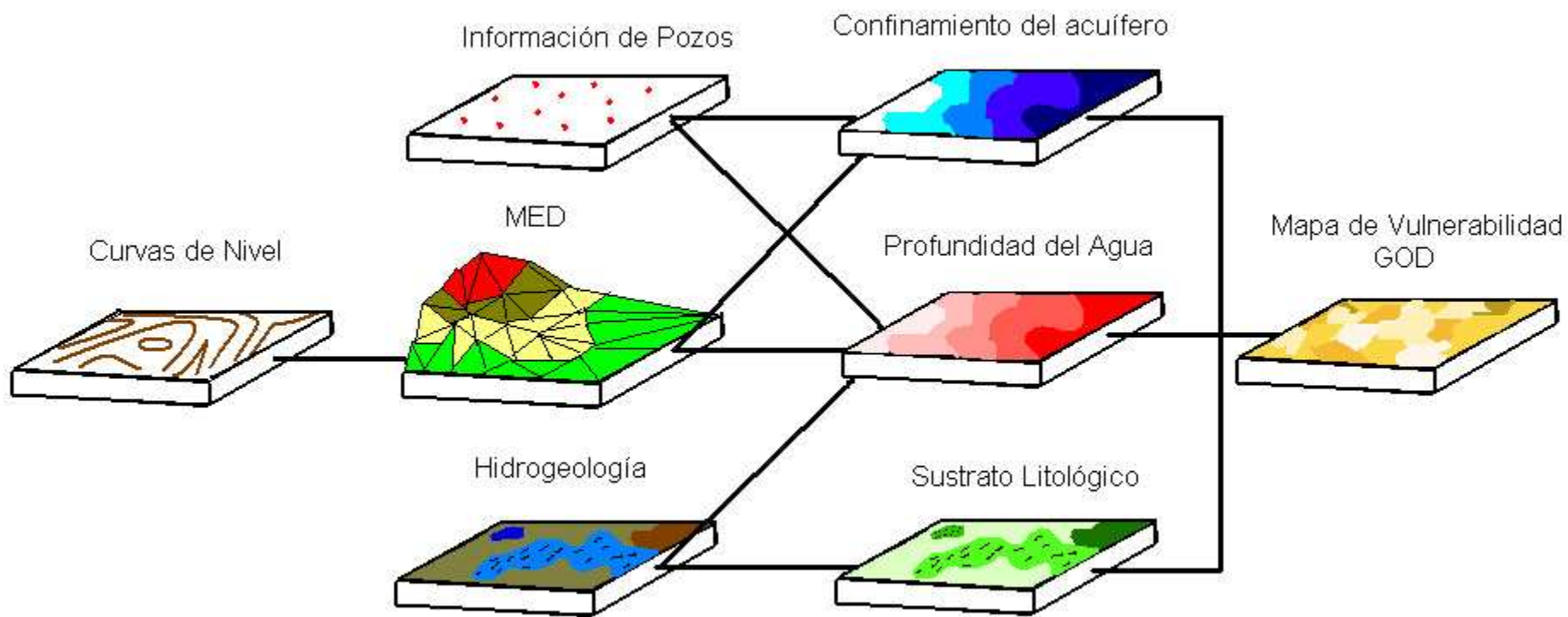
Como se mencionó en la descripción del método este toma en cuenta la profundidad del nivel del agua, el tipo de substrato litológico y la ocurrencia del agua subterránea o confinamiento del acuífero. La siguiente figura describe esquemáticamente la determinación de las variables el método.

### **Determinación de la profundidad del agua**

Para la determinación del nivel del agua subterránea se utilizó la información de pozos proveniente del SENARA. Esta información contenía la profundidad a la que fueron detectados los niveles del agua subterránea, además de la ubicación geográfica del pozo en coordenadas Costa Rica Lambert Norte. La mayoría de los pozos contenían un solo nivel, pero algunos pozos, sobre todo los pozos de exploración del SENARA, tenían información de dos o tres niveles. La selección de los pozos de estudio se basó en la ubicación del pozo dentro o cercano a la zona de estudio. Además se tomo en cuenta que la información que contenía el archivo del pozo fuera lo suficientemente clara y completa.

- Creación del Modelo de Elevación Digital, por medio del comando Topogrid, con información de curvas de nivel de las hojas 1:10000
- Establecimiento de la elevación de los pozos, por medio del MED
- Calculo de la elevación de los niveles, con la información de pozos
- Establecimiento de la correlación entre niveles, por medio de la información litológica de cada pozo y los perfiles obtenidos
- Creación de las superficies freáticas, una vez establecida la correlación entre niveles.

Como en el caso del Valle Central, se presentan diferentes niveles acuíferos, se utilizó para cada zona el nivel con menor profundidad. Para el caso del acuífero la Libertad, se estimó la extensión del acuífero hasta el punto en que la capa interpolada tocaba la superficie. [El mapa 2](#) muestra los valores de profundidad y el índice GOD respectivo.



*Figura 2 Descripción esquemática del método GOD*

## Substrato Litológico

La geología del Valle Central presenta sobreposición de capas de lavas y tobas e ignimbritas. El método recomienda que se use la capa de mayor espesor para el análisis, sin embargo, dentro de la zona de estudio es difícil determinar cual es la capa de mayor espesor a lo largo de todo el área de estudio. La mejor información que se tiene al respecto es el Mapa Hidrogeológico del Valle Central y esencialmente muestra los afloramientos de las lavas en los cauces de los ríos y la presencia de lahares y aluviones al noreste de la zona de estudio, con tobas e ignimbritas en el resto de la zona.

La categorización para cada uno de los tipos fue:

Substrato	Índice
Lavas	0.80
Tobas e ignimbritas	0.65
Lahares	0.60
Aluvión	0.65

[El mapa 3](#) muestra la distribución espacial de estos valores.

## Ocurrencia del Agua subterránea

De los datos del SENARA se desprende que los dos acuíferos presentes en el análisis son no confinados (SENARA, 1988), al menos en gran parte de la zona de estudio.

Es claro que el nivel de confinamiento de los acuíferos en esta zona debe ser estudiado con mayor detalle. Sin embargo para efectos de esta investigación, se consideró adecuado calcular la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la zona con un valor de ocurrencia de 0.9.

[El mapa 4](#) muestra el resultado del Índice de Vulnerabilidad GOD.

## Determinación de la vulnerabilidad método DRASTIC

El método DRASTIC y la forma en que se obtienen las variables se describe esquemáticamente en la siguiente figura.

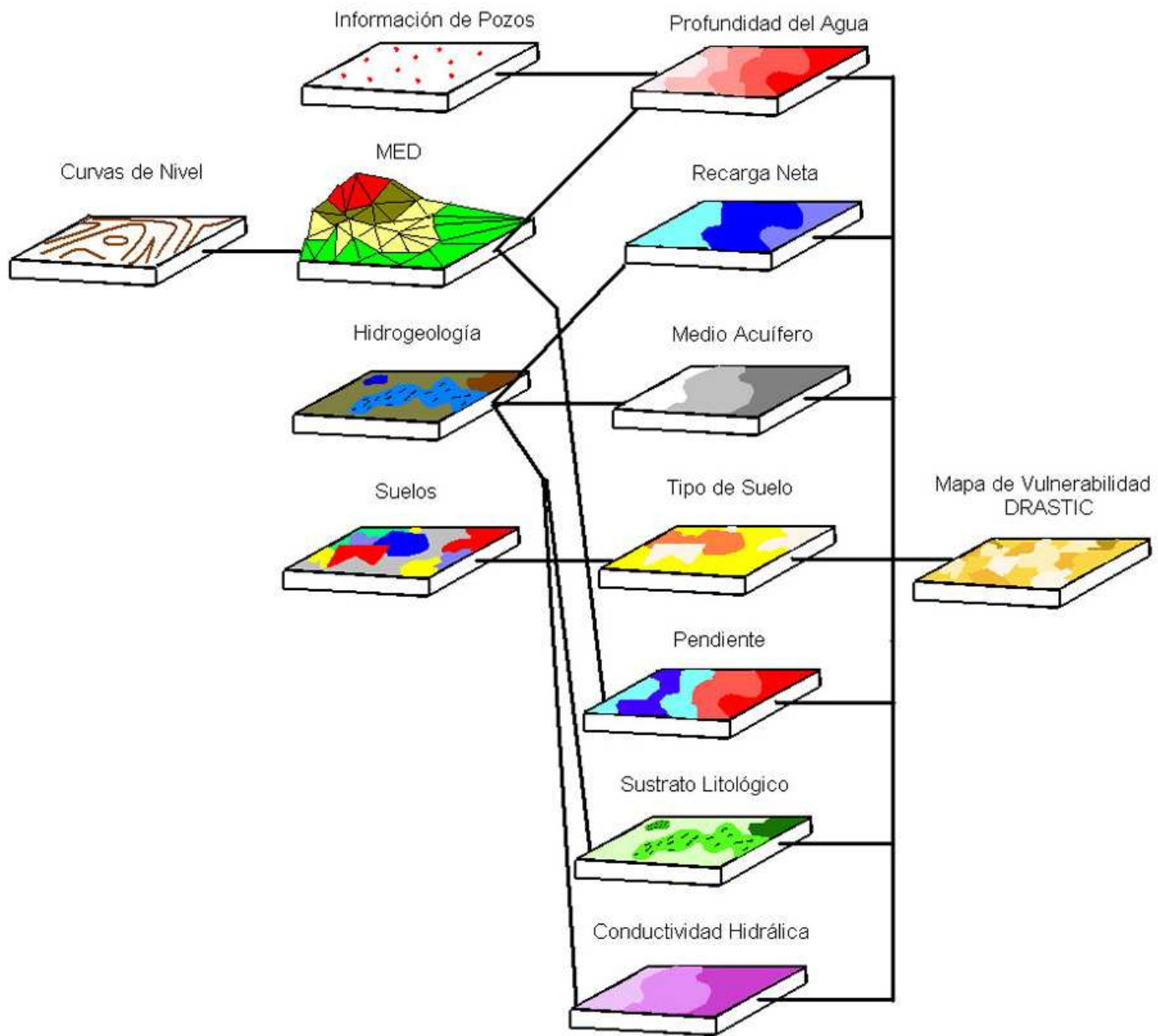


Figura 3 Descripción esquemática del método DRASTIC

## **Profundidad del agua**

La forma en que se calculó la profundidad del agua se describió detalladamente en el capítulo anterior. [El mapa 5](#) muestra la clasificación de profundidad según este modelo.

## **Recarga Neta**

La recarga neta es una de las variables más difíciles de determinar, sin embargo, con la información proveniente de la Estación Meteorológica 84046 San Josecito de Heredia, se realizó el balance hídrico para estimar la recarga al acuífero en este punto. De este balance se determinó que la recarga anual supera los 1000mm.

Claramente la recarga estimada está muy por encima del valor máximo que contempla en método DRASTIC por lo que el índice por recarga es 9. Esto es una importante limitación del método para regiones con altas precipitaciones y altas tasas de infiltración

## **Tipo de acuífero**

Los acuíferos del Valle Central se encuentran esencialmente en formaciones de lavas que van desde lavas brechosas hasta lavas densas y en algunos casos las capas de lavas son atravesadas por estratos de tobas e ignimbritas. Utilizando la clasificación DRASTIC se le dio a toda la zona de estudio un valor de 5. Se utiliza el valor más alto del intervalo por la condición de fracturación de las lavas que aumenta la vulnerabilidad.

## **Tipo de suelo**

Para la clasificación de tipo de suelo se utilizó el Mapa de Grandes Asociaciones de Suelos, Escala 1:200000, elaborado por el MAG en el año 1977. El [mapa 6](#) muestra la distribución de las clases de suelos y su clasificación según el método.

Los cuatro tipos de suelos son:

### *Suelo V2*

Suelos con arcillas pegajosas y adhesivas que se agrietan en verano, de color oscuro, seco por más de 90 días acumulativos, algunos menos, contenido de arcillas 2:1 y otros mejor contenido de materia orgánica. Por su buen contenido de arcillas se le asignó un índice DRASTIC de 3.

### *Suelo I6*

Suelo oscuro y profundo con buen contenido de materia orgánica y bajo en bases derivado de cenizas volcánicas, se asocia con texturas más gruesas y baja saturación de bases. Este suelo se clasificó con un valor DRASTIC de 5 por su textura más gruesa, que aumenta la permeabilidad.

### *Suelo I7*

Suelo oscuro y profundo con buen contenido de materia orgánica y bajo en bases derivado de cenizas volcánicas, se asocia a suelos con problemas de drenaje. Su índice DRACTIC es estimado en 4 pues posee una baja permeabilidad que produce los problemas de drenaje.

### *Suelo I26*

Suelo rojo, profundo, bajo en bases, asociado con suelos con muy poco desarrollo y delgados; y suelos poco más desarrollados pero poco profundos en relieves sinuosos y de montaña. Por ser suelos delgados se le asignó un valor del índice DRACTIC de 8.

## **Pendiente**

La determinación de la pendiente se realizó por medio del Modelo de Elevación Digital. Una rutina en el SIG permitió establecer la pendiente de cada celda y luego reclasificar el 'grid' en las clases correspondientes. Para establecer la pendiente en cada celda el algoritmo calcula las diferencias de elevación entre la celda objetivo y las ocho celdas inmediatamente contiguas, de esta forma establece la máxima pendiente y asigna el valor a la celda. [El mapa 7](#) muestra los resultados.

## **Impacto en la zona no saturada**

Al igual que el método de GOD se utilizó Mapa Hidrogeológico del Valle Central. La categorización correspondiente se muestra en el [mapa 8](#)

Para el aluvión se estableció un valor de 8 pues se utilizó el valor típico de la categoría de arena y grava. Para establecer el valor del índice para las lavas, tobas y lahares se utilizó la categoría de rocas ígneas o metamórficas. A las lavas se les asignó un valor de 7 por su mayor permeabilidad y por el grado de fracturación que presentan. Las tobas por su parte presentan una menor permeabilidad por lo que se utilizó el valor típico de rocas ígneas para establecer el índice I. En el caso de los lahares, estos poseen una menor permeabilidad que las lavas y tobas por lo que se asignó un valor de 2.

## **Conductividad Hidráulica**

La conductividad hidráulica de los acuíferos se estableció a través de pruebas de campo realizadas por el SENARA para el estudio titulado Continuación de la investigación hidrogeológica en la zona norte y este del Valle Central, Costa Rica.

Las pruebas fueron de tipo Gild-Gavard para carga constante elevando el nivel del agua unos pocos centímetros para no variar el espesor saturado del acuífero.

En esta prueba se aísla la sección del acuífero que va a ser analizada y por medio de una carga constante se establece un flujo dentro del acuífero. La conductividad se establece a partir de la presión con la que el flujo ingresa a la formación rocosa.

Para dicho informe se realizaron varias pruebas de conductividad en diferentes capas de lavas, de las cuales solo una prueba corresponde al nivel estimado del acuífero A. Como solo se contó con un valor se definió con este valor la conductividad en éste. Para el nivel B se contaba con más datos, por lo que se calculó la variación espacial de la conductividad. [El mapa 9](#) muestra los resultados.

Para calcular la variación espacial de la conductividad hidráulica se utilizaron los cuatro datos de pozos que se muestran en el [mapa 9](#). La variación espacial de la conductividad hidráulica es mucho más compleja de lo que representa este modelo, pues depende del tipo y permeabilidad del acuífero, fracturación y otros. Sin embargo, por no contar con otra información debió utilizarse este modelo.

Los mapas [10](#) y [11](#) muestran los resultados para el Índice DRASTIC pesticida y no pesticida.

### Análisis de resultados

Por lo anteriormente expuesto se seleccionó el valor de ocurrencia del agua subterránea igual a 0.9. [El Mapa 4](#) presenta el mapa definitivo de Vulnerabilidad a la Contaminación por el Método GOD. El cuadro 2 muestra los valores de área para cada valor de vulnerabilidad y los valores de profundidad y substrato litológico, con un valor constante de ocurrencia del agua subterránea igual a 0.9.

*Cuadro 2 Área acumulada para cada valor de vulnerabilidad según el método GOD (Índice de Ocurrencia igual a 0.9)*

Valor de Vulnerabilidad	Área (Ha)	Área(%)	Valor de Profundidad	Valor de substrato litológico
0.18	1041.51	20.1%	0.30	0.65
0.27	30.24	0.6%	0.50	0.60
0.29	3551.01	68.7%	0.50	0.65
0.36	147.95	2.9%	0.50	0.80
0.41	271.29	5.2%	0.70	0.65
0.50	48.29	0.9%	0.70	0.80
0.53	61.12	1.2%	0.90	0.65
0.65	20.81	0.4%	0.90	0.80

Los mapas de vulnerabilidad DRASTIC arrojan algunos resultados entre los que destacan la mayor variabilidad de valores del índice. Mientras el mapa de Vulnerabilidad GOD posee 2505 polígonos el mapa DRASTIC tiene 4105. Como se vio anteriormente por el bajo

número de variables del Índice GOD el número de diferentes valores era muy reducido (8), mientras para el Índice DRASTIC se encuentran prácticamente todos los valores dentro del rango.

La tendencia del Índice DRASTIC tanto pesticida como no pesticida es similar al Índice GOD, con mayor vulnerabilidad cerca de los cauces de los ríos y cerca del límite del acuífero más somero, en una línea que va prácticamente sobre la coordenada de longitud 526 Costa Rica Lambert Norte.

### Índice DRASTIC Pesticida

Para el Índice DRASTIC Pesticida el valor del promedio ponderado fue 120.23, con un máximo de 212, un mínimo de 89 y una desviación estándar de 11.95. Del Mapa 10 puede observarse que la categoría más grande en área es la de un Índice de Vulnerabilidad entre 121 y 130, de un color celeste claro.

La distribución de áreas se concentra en dos categorías y por ejemplo, ninguna categoría después de un Índice de 130 presenta un valor de área mayor al 5%, lo que quiere decir que los valores de vulnerabilidad relativa pesticida más altos se concentran en regiones muy específicas y de un área muy pequeña.

De los resultados puede establecerse el grupo de más alta vulnerabilidad a partir de un valor de 180. Tres variables (S, I y C) muestran un valor promedio mayor y prácticamente constante a partir de este valor. Por otro lado la profundidad muestra un valor más bajo que sus vecinos en el intervalo de 180 a 185, pero entre 186 y 215 los valores de profundidad son prácticamente 10. La topografía por su parte muestra gran dispersión dentro de este grupo por las razones ya explicadas.

Del [Mapa 10](#) puede verse que la categoría de vulnerabilidad alta corresponde a los tres últimos intervalos, de color rojo. La categoría media alta corresponde a los intervalos de 160 a 180, en colores azul y naranja. De manera análoga pueden establecerse la categoría de vulnerabilidad media entre 120 y 160 y de vulnerabilidad baja entre 89 y 120. El cuadro 3 muestra el resumen de datos del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC pesticida.

*Cuadro 3 Porcentaje de Área dentro de cada categoría del Índice DRASTIC Pesticida*

Vulnerabilidad Relativa	Índice DRASTIC	% del área total
Baja	89-120	38.60
Media	121-160	60.26
Media - Alta	161-180	1.02
Alta	181-212	0.12

## Índice DRASTIC no Pesticida

El valor del promedio ponderado por área del índice DRASTIC no pesticida fue de 100.15, con una desviación estándar de 10.67, un máximo de 185 y un mínimo de 78. En general los valores del índice no pesticida son menores que el índice pesticida. Solo una pequeña área de 0.35% posee valores de vulnerabilidad pesticida menores a los de vulnerabilidad no pesticida.

En el [mapa 11](#) puede observarse que la categoría más extendida es la de un índice no pesticida entre 91 y 100, el color amarillo más intenso. Esta categoría acumula prácticamente el 65% del área. Además en el mapa se muestra la menor influencia de la pendiente con respecto al índice pesticida, debido a su menor peso. Esto puede verse claramente en los alrededores de la ciudad de Heredia, donde la pendiente produce un cambio de categoría en el índice pesticida y no así en el no pesticida. Por otro lado puede observarse un cambio categoría en el índice no pesticida que no se refleja en el índice pesticida por el cambio en la conductividad hidráulica. Este cambio es mucho más evidente cuando la conductividad cambia de 2 a 4, por ejemplo en la línea que pasa por Santo Domingo y hacia el oeste, prácticamente sobre la coordenada de latitud 218 Costa Rica Lambert Norte.

Otra diferencia importante entre los 2 índices es la mayor vulnerabilidad relativa del índice no pesticida sobre las cercanías del Río Tibás. Esto se debe a que la alta pendiente en la zona tiene poco peso en el índice no pesticida y por lo tanto los valores son relativamente mayores.

Dentro de la categoría de vulnerabilidad alta se seleccionaron los valores mayores a 160. Todos los intervalos en esta categoría presentan valores de impacto en la zona no saturada de 7, de conductividad mayores de 7, de profundidad mayor a 8 y de suelo mayor a 4. La topografía en esta categoría presenta gran dispersión, pero su valor es creciente a partir de 2.

En la categoría media alta se ubicaron los intervalos entre 136 y 160. En esta categoría la profundidad, el impacto en la zona saturada y la conductividad son crecientes mientras la topografía es decreciente. El suelo por su parte tiene un valor muy cercano a cuatro.

La categoría de vulnerabilidad media es la que presenta más dispersión y se estableció entre 101 y 135. Su límite con la categoría de vulnerabilidad baja se definió en 101 por la diferencia notable que existe entre los intervalos de 96 a 100 y 101 a 105 en los valores promedio de conductividad y topografía y las diferencias menores en tipo de suelo y profundidad. En el límite superior las variables que rigen el cambio de categoría son la profundidad topografía y conductividad.

El resumen de las categorías se muestra.

*Cuadro 4 Porcentaje de Área dentro de cada categoría del Índice DRASTIC no Pesticida*

Vulnerabilidad Relativa	Índice DRASTIC	% del área total
Baja	76-100	70.45
Media	101-135	27.45
Media - Alta	136-160	1.85
Alta	161-185	0.25

### **Conclusiones**

#### **De la disposición y procesamiento de la información**

1. Para la determinación de la profundidad del agua la información de pozos es muy valiosa pero debe ser utilizada con cuidado. La correlación entre los niveles de diferentes pozos puede ser establecida a través de perfiles hidrogeológicos. En caso de que el nivel en un pozo cause contradicciones con respecto a los pozos vecinos, esta información debe descartarse pues puede provenir de un nivel colgado, una inadecuada medición u otros inconvenientes.
2. La conductividad hidráulica es una de las variables que presenta mayor incertidumbre por la escasez de información disponible al respecto, debido sobre todo a que las pruebas de conductividad hidráulica se llevan a cabo con fines de investigación, por lo que son escasas. Otra posibilidad considerada es la de establecer la conductividad hidráulica por medio de las pruebas de bombeo, que se llevan a cabo en un número mayor de pozos.
3. La recarga neta es otra variable con una incertidumbre alta pues para el caso de este estudio se contó con solo un dato puntual para su determinación. Sin embargo la alta precipitación de la zona genera recargas que indudablemente se encuentran en la categoría más alta según la metodología DRASTIC.
4. La información de suelos proveniente del Mapa de Grandes Asociaciones de Suelos elaborado por el MAG, resulta apropiada para los fines de este estudio pues describe características del suelo tales como contenido de arcilla y textura, con las cuales se puede estimar su capacidad de atenuación. Sin embargo esta información presenta un bajo nivel de detalle debido a la escala del mapa(1:200000). Como alternativa se puede generar con apoyo de trabajo de campo, un mapa de suelos a partir de la geología de la zona, pero esta opción resulta más cara.
5. La cantidad y distribución espacial de los pozos que contaban con un registro detallado en la base de datos en el SENARA, permitió establecer con bastante precisión el nivel freático de los acuíferos Colima, no así en del acuífero superior a estos(La Libertad), porque se contaba con muy pocos pozos en los que se registraba este nivel.

## De las metodologías utilizadas para la determinación de la vulnerabilidad

1. Las metodologías de determinación de la vulnerabilidad en general, buscan establecer las características intrínsecas del acuífero y las capas superiores a éste relacionadas con el transporte y capacidad de atenuación de contaminantes.
2. Internacionalmente las metodologías de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) y GOD (Foster, 1987) son ampliamente difundidas. Mapas de Vulnerabilidad de diferentes países y regiones como Portugal, Sudáfrica, Florida y Texas han sido elaborados y publicados por diferentes investigadores.
3. La metodología DRASTIC utiliza las variables de profundidad del agua subterránea, recarga neta, tipo de acuífero, tipo de suelo, pendiente, impacto en la zona no saturada y conductividad hidráulica. El método GOD por su parte utiliza la profundidad del agua subterránea, el impacto en la zona no saturada y la ocurrencia del agua subterránea.
4. El uso de Sistemas de Información Geográfica permite la elaboración de los mapas de vulnerabilidad y amenaza de una manera ágil y confiable de forma tal que puede establecerse, incluso, diferentes escenarios de posibles eventos contaminantes.
5. Las metodologías de vulnerabilidad a la contaminación parten del supuesto de aplicación de la carga contaminante en la superficie o directamente debajo de ella. No son apropiadas para la determinación de la amenaza por cargas contaminantes introducidas por debajo del subsuelo.
6. La metodología GOD desprecia el efecto de atenuación del suelo para determinar la vulnerabilidad mientras el DRASTIC lo toma en cuenta. En el método GOD puede ser incluido el efecto del suelo al estimar la amenaza de contaminación. Al despreciar o tomar en cuenta el efecto del suelo en la atenuación de contaminantes y por lo tanto en la vulnerabilidad, debe tenerse sumo cuidado al establecer el posible contaminante y su modo de aplicación en el área.
7. El método DRASTIC es mucho más complejo que el método GOD por la utilización de un número mayor de variables. Sin embargo algunas de estas variables son tomadas también en cuenta por el método GOD en forma indirecta a través de la amenaza.
8. Otra diferencia sustancial es el modelo matemático. Mientras el GOD es un modelo multiplicativo, el DRASTIC es un modelo sumativo con asignación de pesos a las variables.
9. El Índice DRASTIC, tanto pesticida como no pesticida, presenta una mayor variabilidad que el Índice GOD, tanto por su mayor número de variables como por su mayor número de categorías en cada variable.
10. La clasificación del substrato litológico o zona no saturada del método GOD es más apropiada para un medio geológico de origen volcánico que la utilizada por el DRASTIC. Esto por cuanto el detalle y la descripción de las formaciones geológicas se aproxima más a las condiciones del país.
11. La variable de ocurrencia del agua subterránea del método GOD es confusa y difícil de estimar. Además el efecto en la inaccesibilidad hidráulica ya fue tomado en cuenta por la variable de substrato litológico. Por ello sería conveniente sustituirla por una variable de mayor importancia, como el tipo de suelo.

12. Las variables más importantes en la determinación de la vulnerabilidad DRASTIC a contaminantes pesticidas son la profundidad del nivel freático, el tipo de suelo y la conformación de la zona no saturada. Por el tipo de contaminante, el tipo de suelo es muy importante ya que la elevada actividad biológica y química en el suelo permite una mayor atenuación y eliminación de contaminantes pesticidas.
13. Para contaminantes no pesticidas las variables de mayor peso en el índice DRASTIC son la profundidad del nivel freático y la conformación de la zona no saturada. Este índice disminuye el efecto del suelo al asignarle un peso de 2.
14. La vulnerabilidad DRASTIC aumenta conforme aumenta la conductividad hidráulica, porque disminuye el tiempo de residencia dentro del acuífero. Sin embargo el tiempo de residencia dentro del acuífero es muy bajo con respecto a la zona no saturada, por lo que el efecto en la atenuación de contaminantes es bajo. Por el contrario, si la conductividad hidráulica es alta, las velocidades de flujo son altas y el fenómeno de dispersión hidrodinámica contribuye en mayor grado a la atenuación del contaminante por dilución.
15. La variable de tipo de acuífero presenta una situación similar a la de conductividad hidráulica, pues conforme aumenta la permeabilidad, y por lo tanto la velocidad de flujo, aumenta la vulnerabilidad.
16. Cuando existe información suficiente puede utilizarse el método GOD como determinación preliminar y el método DRASTIC para la estimación de la vulnerabilidad de una forma más detallada.
17. Lo anterior no quiere decir que la metodología DRASTIC sea mejor o peor que el índice GOD. Lo cierto es que la metodología DRASTIC es más elaborada y por lo tanto el método GOD puede ser utilizado en casos donde la información no sea suficiente para determinar el índice DRASTIC.
18. Para las condiciones nacionales podrían utilizarse las variables de Profundidad del agua, Impacto en la zona no saturada, tipo de Suelo y topografía para un nuevo Índice Pesticida. Para un Índice no Pesticida pueden utilizarse la Profundidad del agua, el Impacto en la zona no saturada y el tipo de suelo.

#### **De los resultados de vulnerabilidad en el área de estudio**

1. Debido a que los tiempos de residencia del agua en la zona no saturada son altos, los efectos de los eventos contaminantes se pueden apreciar en años o décadas. Este tiempo puede ser menor en el caso de infiltraciones al acuífero desde el cauce de los ríos.
2. En general los índices DRASTIC y GOD coinciden en las áreas de más alta vulnerabilidad, debido al mayor peso de las variables de profundidad y conformación de la zona no saturada en el índice DRASTIC, que son dos de las tres variables del índice GOD.
3. Las diferencias más importantes en los métodos se dan en las zonas de vulnerabilidad media y baja, donde las variables del índice DRASTIC que no toma en cuenta el GOD tienen mayor importancia.
4. La mayoría de la zona de estudio se encuentra en niveles de vulnerabilidad baja o media, debido a la profundidad del agua y la protección de tobas e ignimbritas principalmente. De toda el área de estudio mucho menos de un 5% tiene un nivel alto de vulnerabilidad.

5. Según las dos metodologías las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación se concentran cerca de los cauces de los ríos Virilla y Tibás y al sur de la ciudad de Santo Domingo de Heredia, en la zona de Santa Rosa.
6. La zona cercana al Río Tibás es la que presenta un menor riesgo de contaminación por la cobertura boscosa que lo protege. La zona del Río Virilla presenta un mayor riesgo debido a la poca protección boscosa y al elevado nivel de contaminación de las aguas del río, que podrían infiltrarse rápidamente al cuífero.
7. La zona sur de Santo Domingo puede presentar también un riesgo alto de contaminación en el futuro si el crecimiento urbano alcanza la zona con densidades altas sin alcantarillado sanitario o actividades industriales.

### **Recomendaciones**

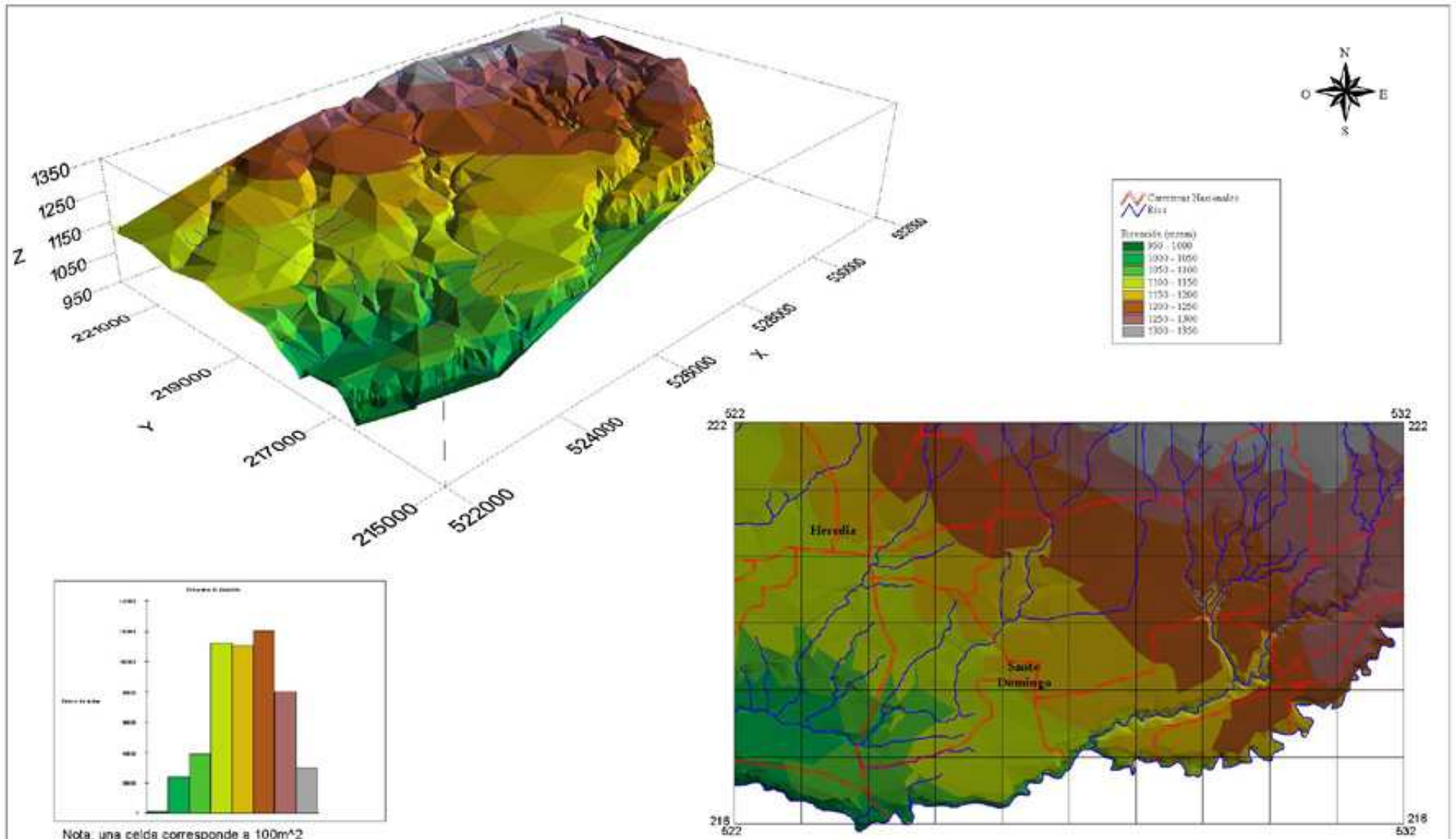
1. Para mejorar los resultados del método se pueden obtener datos de suelos a una escala más pequeña, para mejorar el detalle en el tipo de suelo. Si el área es pequeña y los recursos lo permiten, información de campo puede reforzar los mapas de suelos.
2. El SENARA debería introducir la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, como una forma de almacenar digitalmente sus bases de datos, así como procesar la información de pozos para obtener datos como niveles freáticos, contactos geológicos y otra información hidrogeológica. Así podría suministrar o vender información y servicios de mejor calidad.
3. Es necesario establecer más claramente los límites del acuífero La Libertad para mejorar la estimación de vulnerabilidad. Para ello es necesaria una investigación hidrogeológica detallada.
4. Para llevar a cabo un análisis de riesgo de contaminación más detallado es necesario recolectar información relacionada con las industrias como tipo, consumo de agua, existencia de plantas de tratamiento y productos de desecho entre otros. Otras fuentes puntuales de contaminación como botaderos y gasolineras pueden ser incorporadas a un registro de posibles fuentes de contaminación manejada por los organismos responsables, ya sea el SENARA o el MINAE.
5. Las autoridades responsables deben llevar a cabo un estricto control de todas estas posibles fuentes contaminantes, para evitar episodios de contaminación que puedan afectar la calidad del agua de los acuíferos en el futuro.
6. Las metodologías aquí discutidas son formas de estimar preliminarmente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Para establecer claramente el riesgo real de contaminación son necesarios estudios hidrogeológicos y ambientales mucho más pormenorizados. Es recomendable que las instituciones responsables concentren esfuerzos en determinar el riesgo de contaminación del acuífero para establecer las medidas preventivas necesarias, ya que las medidas correctivas son altamente costosas y a veces imposibles de realizar.
7. La protección del cauce del río Tibás es primordial para evitar la contaminación del acuífero a través de las zonas de alta vulnerabilidad aledañas a este río.
8. Es necesario disminuir la contaminación del Río Virilla para evitar la posible contaminación de los acuíferos Colima. Para ello debe evitarse el vertido de aguas negras y residuales al cauce.

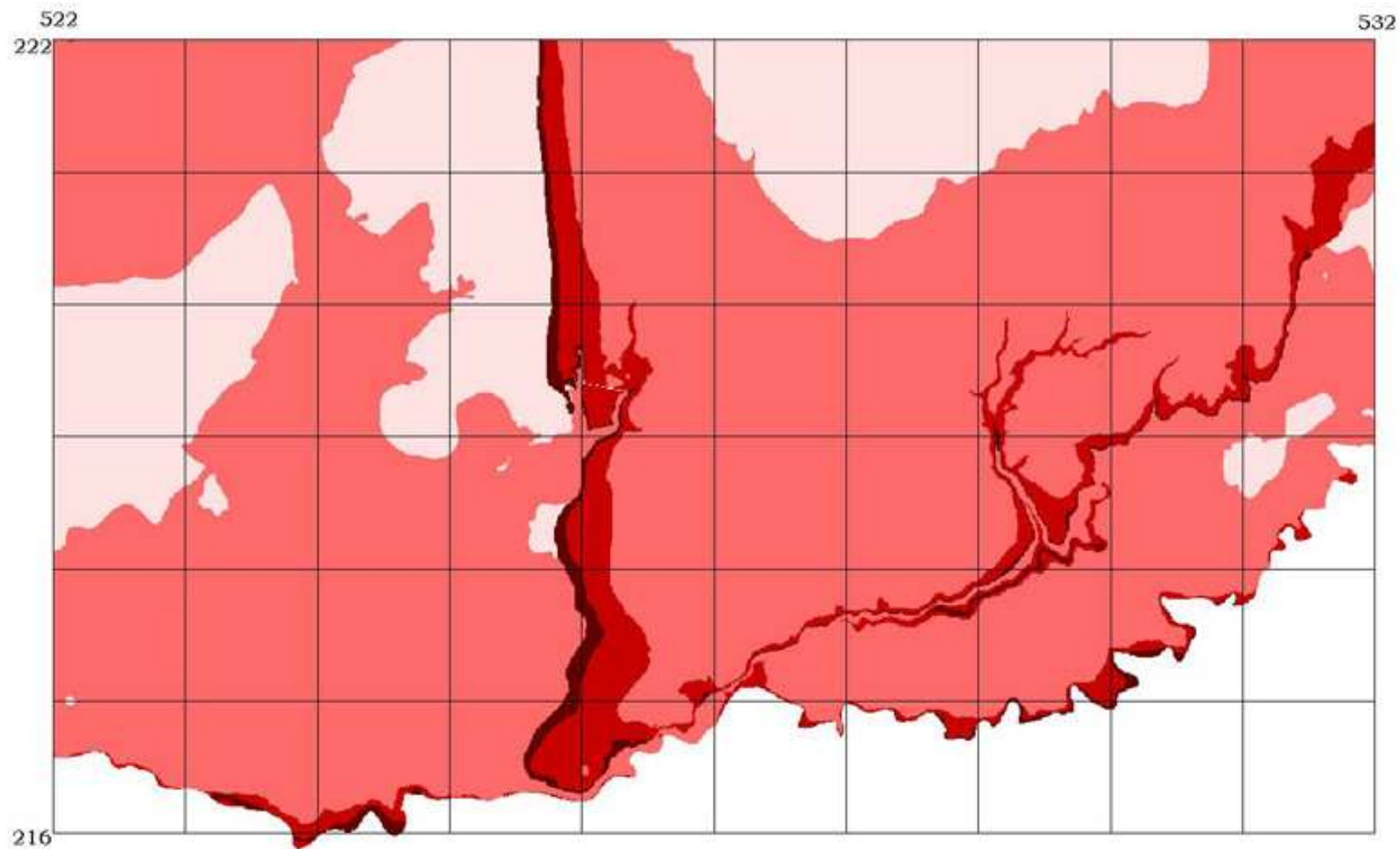
9. Un sistema de alcantarillado sanitario es necesario, primordialmente, en las zonas de mayor vulnerabilidad y aledaños, para disminuir el riesgo de contaminación microbiológica de las aguas subterráneas.
10. Las autoridades responsables como el MINAE y las municipalidades deben procurar la protección de los cauces de los ríos, no solo por medio de la promulgación de leyes y reglamentos como planes reguladores, sino por medio de la vigilancia de la efectiva aplicación de éstos.
11. Dada la alta vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos a lo largo de los cauces de los ríos Virilla y Tibás, es necesario establecer cuanto antes el tipo de interacción entre el río y el acuífero, pues existe el riesgo de transmisión de contaminantes del río (Sobre todo el Virilla) al acuífero.

### **Bibliografía y Referencias**

1. Agüero Valverde, Jonathan: *Análisis de Vulnerabilidad a la Contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica*. Proyecto de Graduación, enero del 2000.
2. *El Agua Potable en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*. Tercer borrador realizado por ProDUS, UCR. Agosto de 1998.
3. *Atlas geológico de la Gran Área Metropolitana*, compilado por Percy Denyer y Siegfried Kussmaul, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1994.
4. Civita, M.V. y De Maio, M *Mapping Groundwater vulnerability in areas impacted by flash flood disasters*, 1999, internet site Esri.
5. Civita, M.V. y De Maio, M *Assessing Groundwater cantamination risk using ArcInfo via GRID function*, 1999, internet site Esri.
6. Custodio, E y Llamas, M: *Hidrología Subterránea*. Tomo I. Ediciones Omega, segunda edición Barcelona 1983.
7. Deller, J. W. Editor en Jefe, *The Hanbook of Groundwater Engineering*, CRC Press LLC, 1998.
8. Esri, *ArcView GIS, The Geographic Information System for Everyone*, Enviromental Systems Research Institute, California, USA.
9. Esri, *ArcView Spatial Analyst, Avanced Spatail Analysis Using Raster and Vector Data*, Enviromental Systems Research Institute, California,USA.
10. Esri, *ArcView 3D Analyst, 3D Surface Creation, Visualizacion and Analysis*, EnviromentalSystems Research Institute, California, USA.
11. Foster, S y Hirata, R: *Análisis de contaminación de aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico*, documento del CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), con la OMS y la OPS, Lima, Traducción al Español, 1987.
12. Foster, S y Hirata, R: *Contaminación de Aguas Subterráneas*, documento del CEPIS, con la OMS y la OPS, Lima, 1987.
13. Foster, S y Hirata, R: *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*, documento del CEPIS, con la OMS y la OPS, Lima, 1991.
14. Foster *et al.*: *Groundwater in Urban Development*, World Bank Technical Paper N° 320, 1998

15. Isaaks, E y Srivastava, R. M.: *Applied Geostatistics*, Oxford University Press New York, 1989.
16. Lillesand, T. M. y Kiefer, R.W.: *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, tercera edición, 1994.
17. Lobo-Ferreira, J. P.: *GIS and mathematical modelling for the assessment of vulnerability and geographical zoning for groundwater management and protection*. Lisboa, octubre 1997. Documento de Internet.
18. Mora Ch., Rolando: *Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 1998.
19. Passehl, J. A. *The Aquifer Vulnerability Assessment Model (an applied Arc/Info<sup>™</sup> Grid Model)*, Miami, setiembre 1997. internet site: Department of Environmental Protection, Division of Water Facilities, State of Florida.
20. Robinson, Timothy: *Diagnóstico de las cuencas de los ríos Ciruelas y Segundo, aplicando la tecnología de los sistemas de información geográfica*. Memoria del VI Congreso Nacional de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental Octubre 1998.
21. Rodríguez, Hugo: *Análisis de hidrogramas de ríos para calcular la recarga promedio a los acuíferos de Costa Rica*. Memoria del VI Congreso Nacional de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Octubre 1998.
22. Rodríguez, Hugo: *Impacto del desarrollo urbano sobre la recarga de los acuíferos Colima*. Departamento de Estudios Básicos, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. San José 1993.
23. SENARA: *Continuación de la Investigación Hidrogeológica en la zona norte y este del Valle Central, Cota Rica*, Informe Final, 1988.
24. SENARA y British Geological Survey: *Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica*, San José 1985.
25. Zamora, Luis y Pujol, Rosendo. *Contaminación de los ríos de la cuenca del Río Grande*. BUN-ProDUS, 1998.





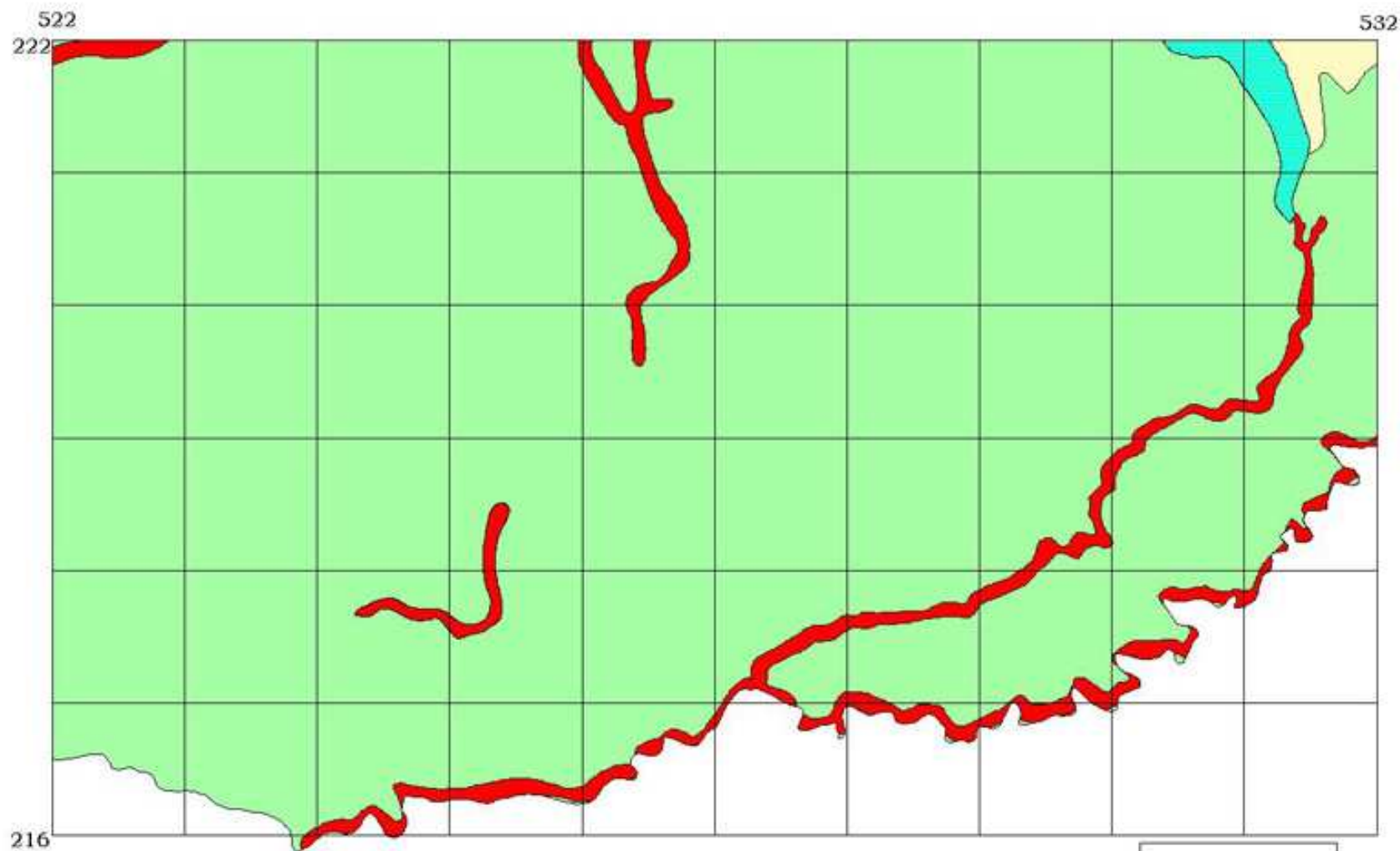
Clasificación por Distancia al Agua		
	< 5m	0.9
	5 - 20m	0.7
	20 - 100m	0.5
	> 100m	0.3

### Mapa 2 Clasificación por Distancia al Agua Método GOD

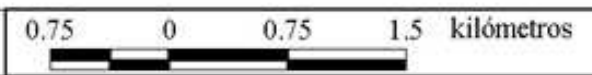


Fuente: SENARA 1999, IGN-JICA mapas 1:10000 1989  
 Elaborado por Jonnathan Agüero Valverde, noviembre 1999





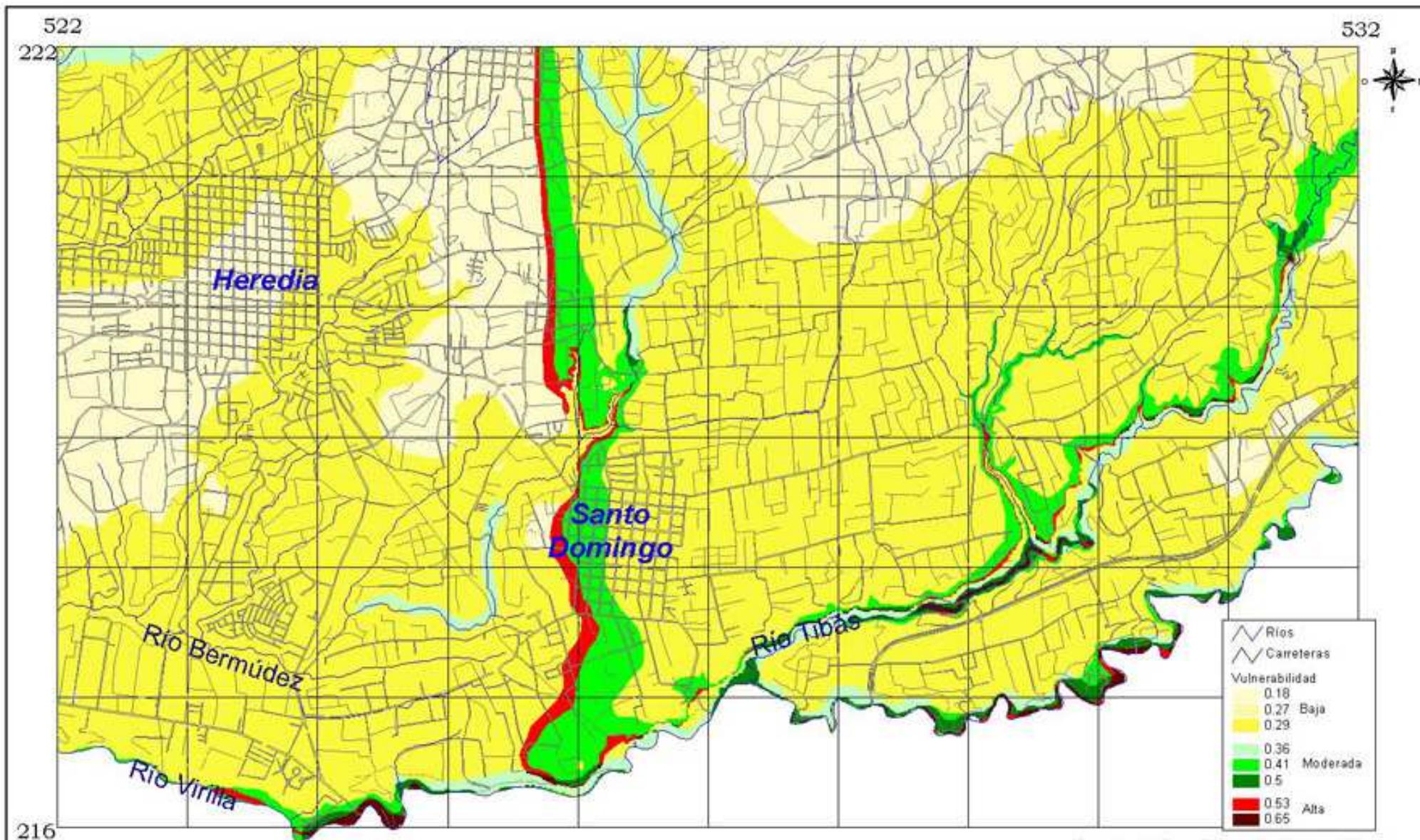
Substrato Litológico	
Lahares	0.60
Tobas	0.65
Aluvión	0.65
Lavas	0.80



### Mapa 3 Clasificación para el Substrato Litológico Método GOD

Fuente: Mapa Hidrogeológico del Valle Central SENARA-BGS, 1985, IGN-JICA mapas 1:10000 1989  
 Elaborado por Jonnathan Agüero Valverde noviembre 1999

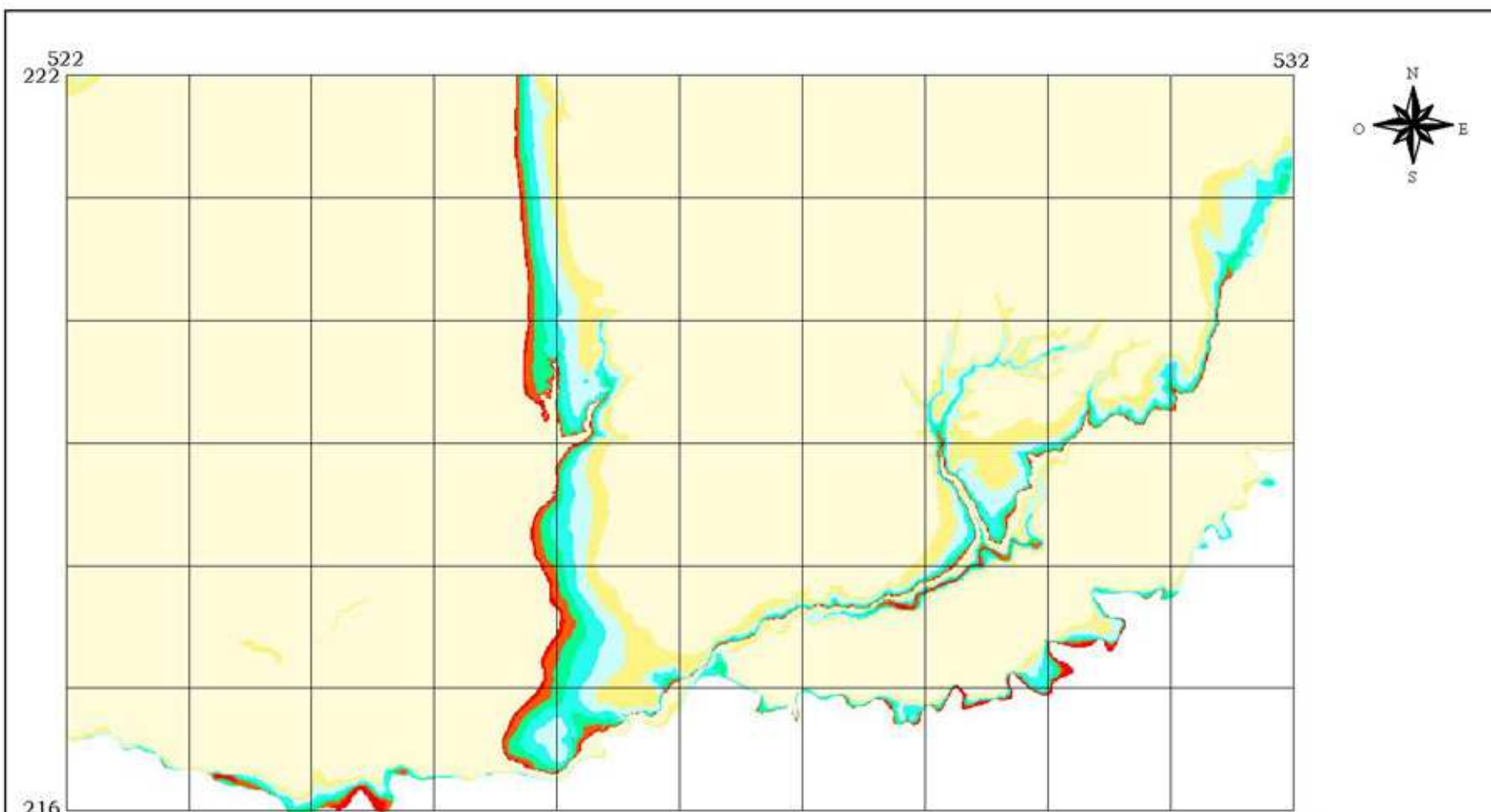




**Mapa 4 Índice de Vulnerabilidad a la Contaminación GOD\***

Fuente: Mapa Hidrogeológico del Valle Central, SENARA-BGS, 1985; IGN-JICA mapas 1:10000, 1989  
 Elaborado por Jonathan Agüero Valverde, noviembre 1999

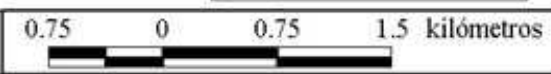




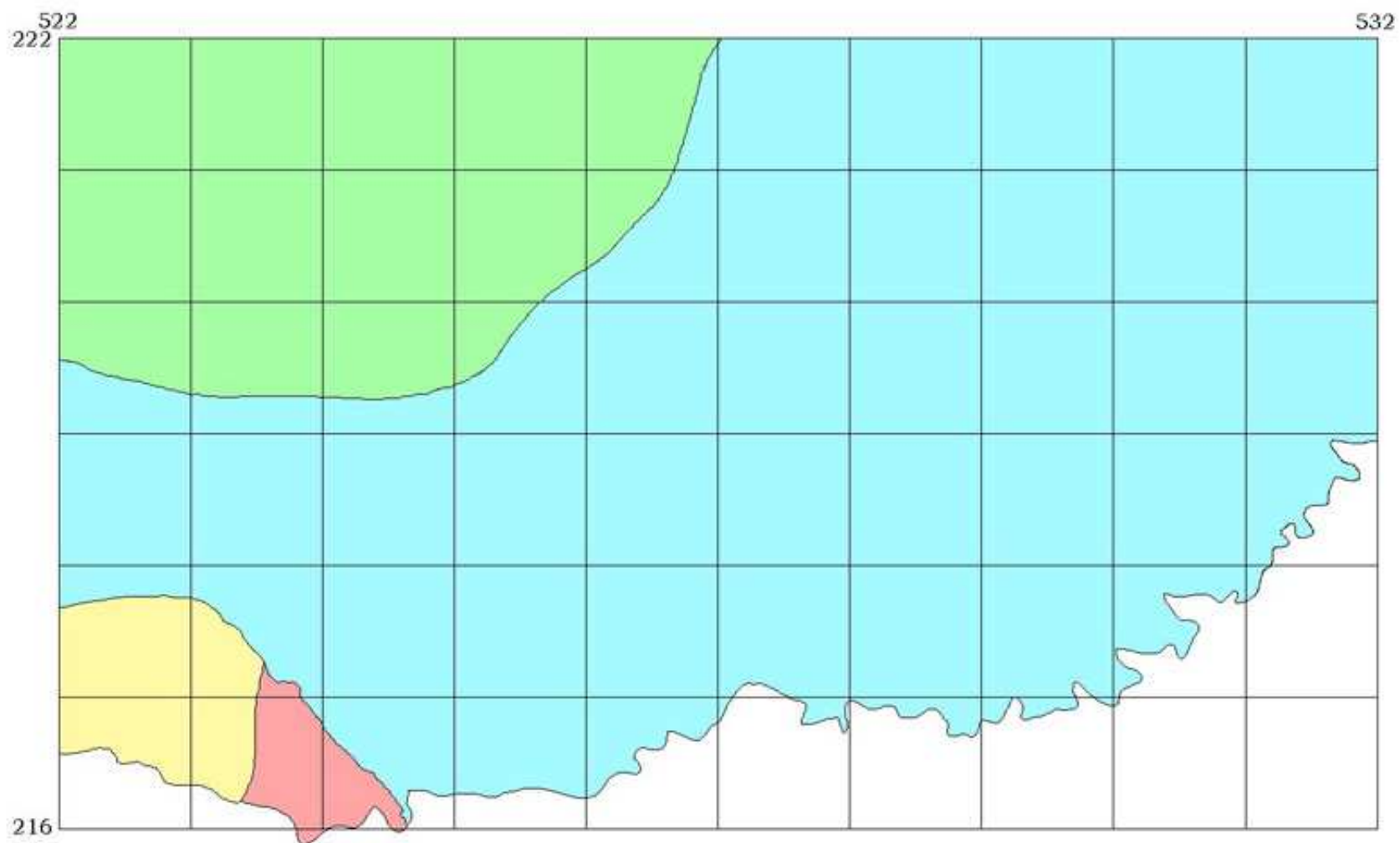
Clasificación de profundidad





10	0 - 1.5m
9	1.5 - 4.6m
7	4.6 - 9.1m
5	9.1 - 15.2m
3	15.2 - 22.9m
2	22.9 - 30.5m
1	> 30.5m

**Mapa 5 Clasificación DRASTIC de profundidad del agua**



Fuente: Mapa Hidrogeológico del Valle Central, SENARA-BGS, 1985, IGN-JICA mapas 1:10000, 1989  
 Elaborado por Jonathan Agüero Valverde, noviembre 1999



Clasificación de tipo de suelo	
	V2 S = 3
	I6 S = 5
	I7 S = 6
	I26 S = 7

**Mapa 6 Clasificación DRASTIC de tipo de suelo**



Fuente: Mapa de Grandes Asociaciones de Suelos, MAG, 1977  
 Elaborado por Jonnathan Agüero Valverde setiembre 1999

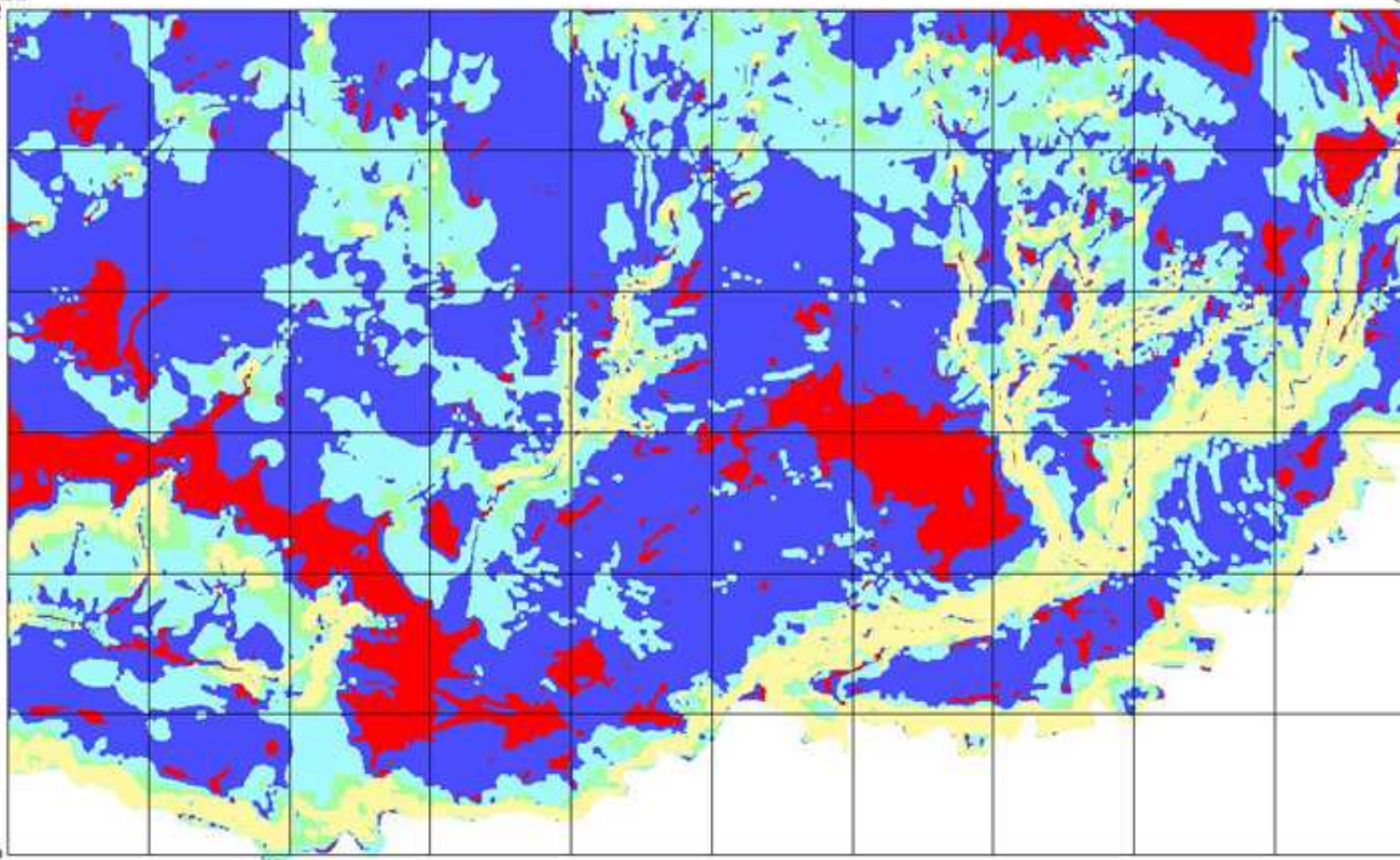


522  
222

532



216



Clasificación de Pendiente

0 - 2%	T = 10
2 - 6%	T = 9
6 - 12%	T = 5
12 - 18%	T = 3
> 18%	T = 1

Mapa 7 Clasificación DRASTIC por pendiente

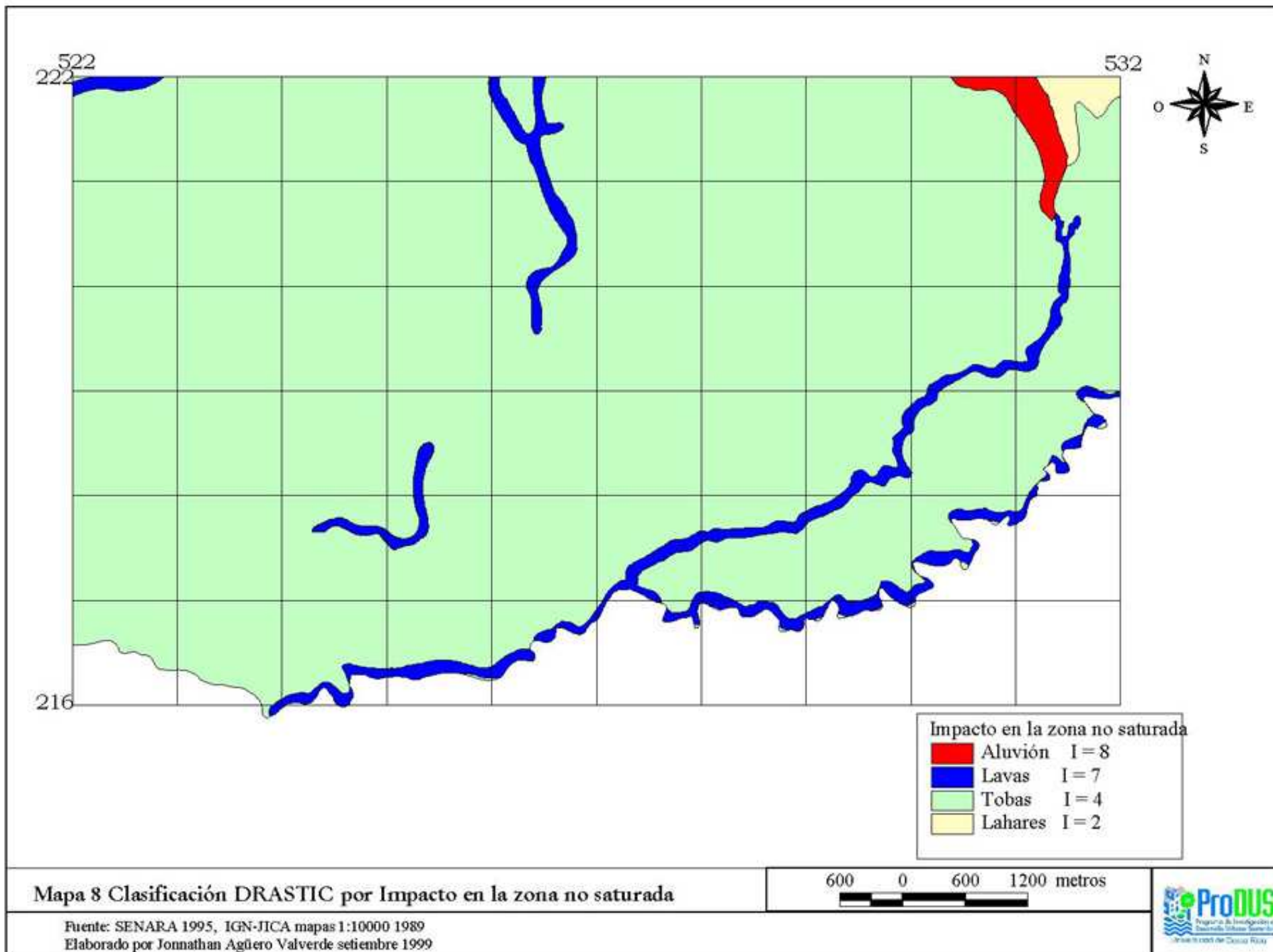
0.75 0 0.75 1.5 kilómetros

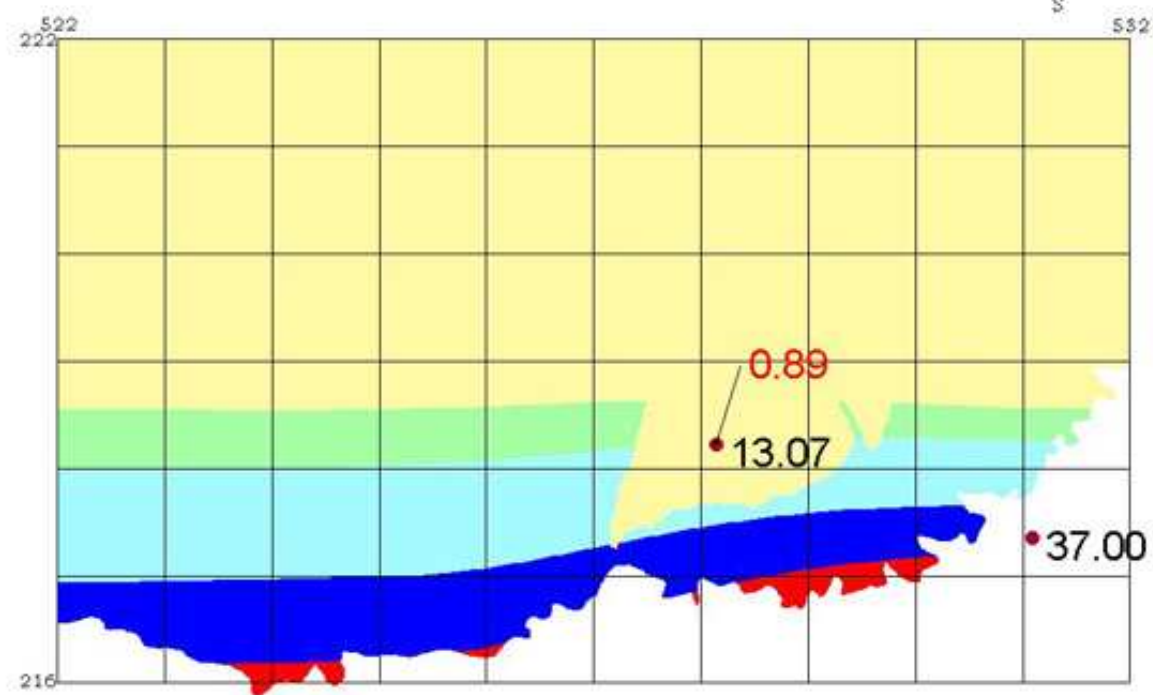


Fuente: IGN-JICA mapas 1:10000 1989

Elaborado por Jonnathan Agüero Valverde setiembre 1999







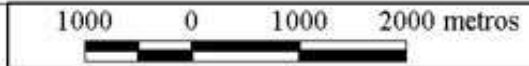
● Pozos con datos de conductividad

Categoría de Conductividad Hidráulica

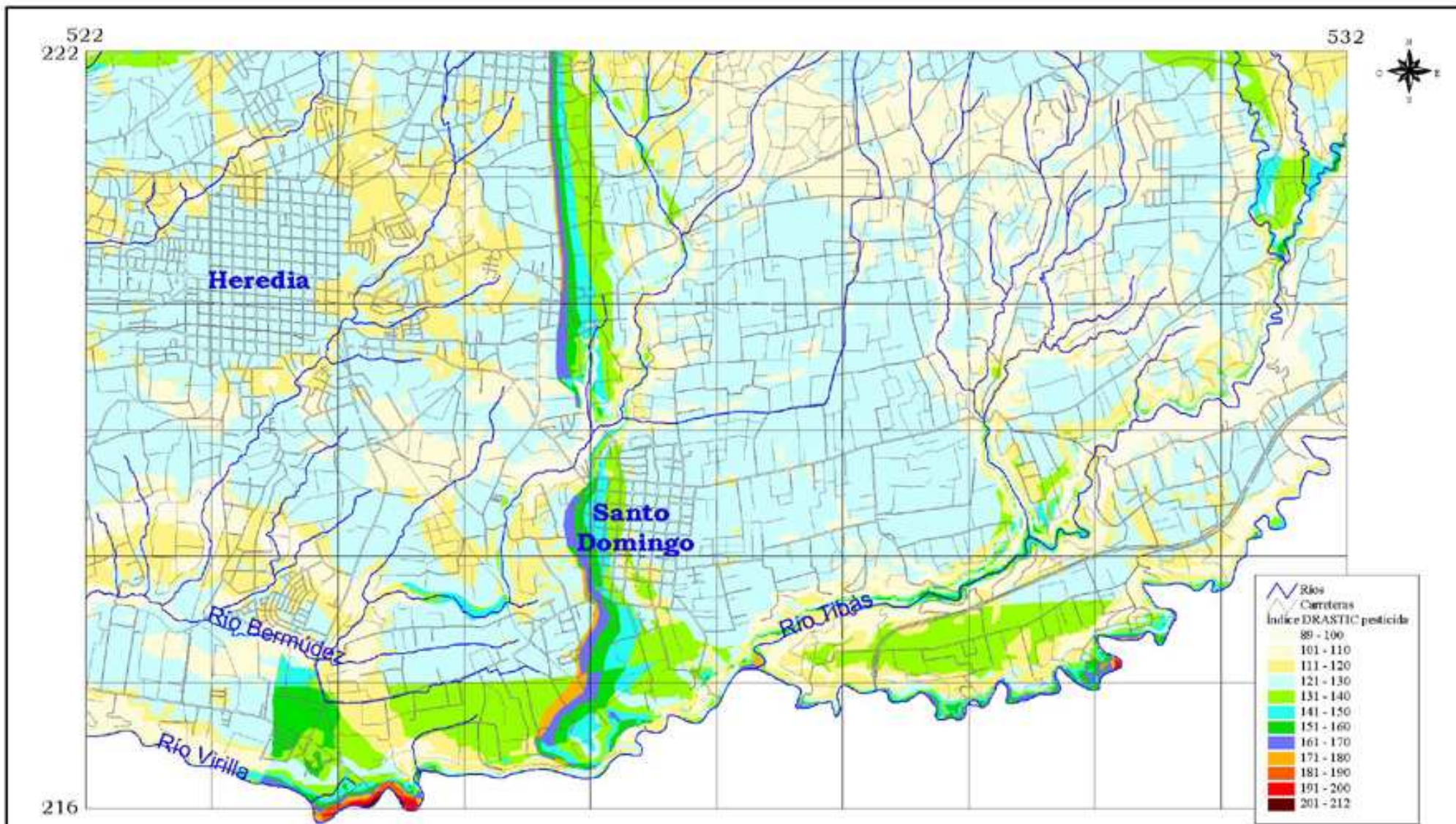
0.04 - 4.07m/d	C = 1
4.07 - 12.22m/d	C = 2
12.22 - 28.52m/d	C = 4
28.52 - 40.75m/d	C = 6
40.75 - 81.49m/d	C = 8

Nota: Los valores en negro corresponden a la medición de la conductividad hidráulica en m/día para el nivel B  
El valor en rojo fue el medido en el nivel A

### Mapa 9 Clasificación DRASTIC de Conductividad Hidráulica



Fuente: SENARA 1995, IGN-JICA mapas 1:10000 1989  
Elaborado por Jonnathan Agüero Valverde setiembre 1999



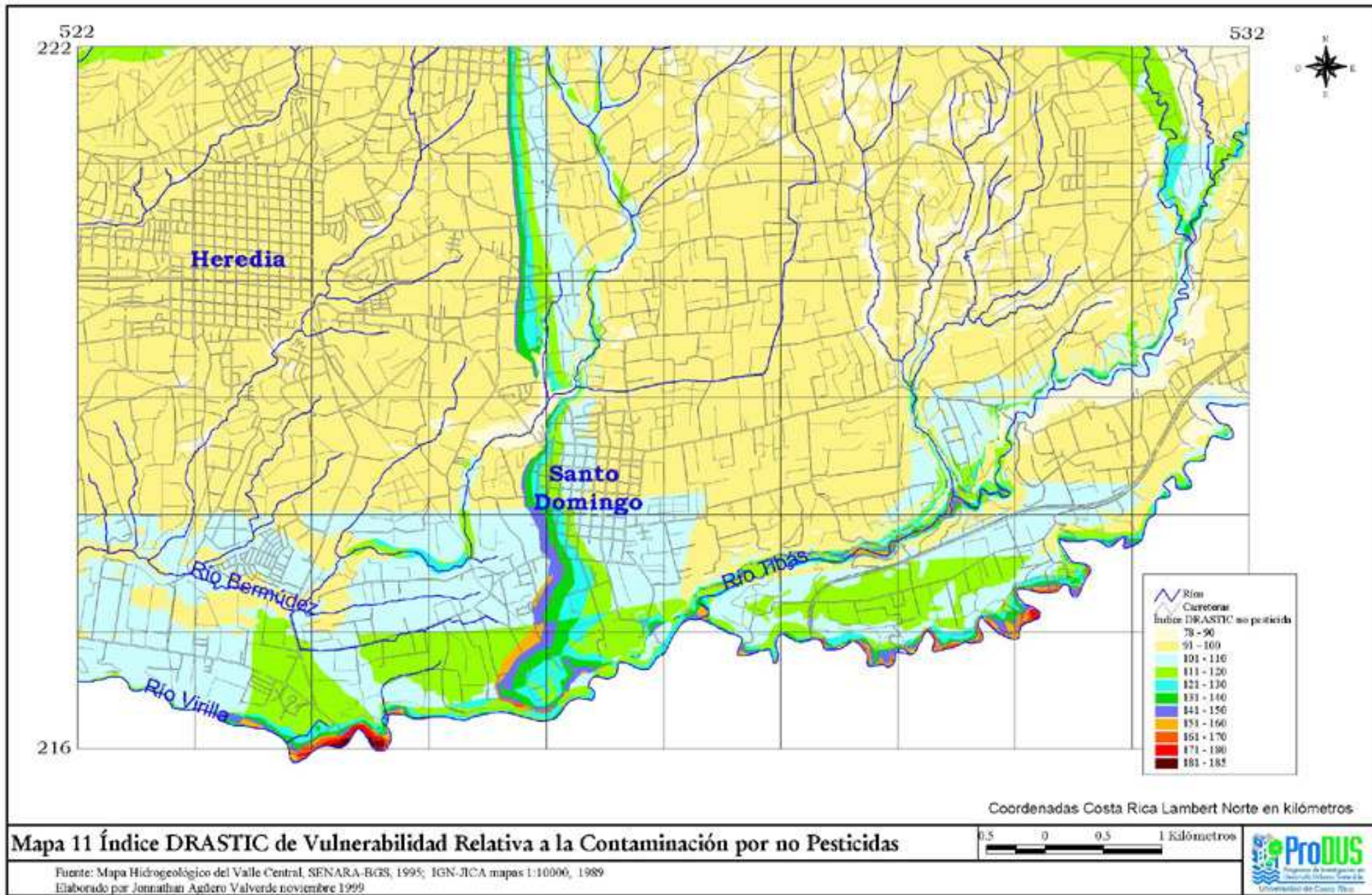
Coordenadas Costa Rica Lambert Norte en kilómetros

**Mapa 10 Índice DRASTIC de Vulnerabilidad Relativa a la Contaminación por Pesticidas**



Fuente: Mapa Hidrogeológico del Valle Central, SENARA-BGS, 1995; IGN-JICA mapas 1:10000, 1989  
 Elaborado por Jonathan Agüero Valverde noviembre 1999





522  
222

532

Heredia

Santo Domingo

Río Bermúdez

Río Tibás

Río Virilla

216

