

Vulnerability to the contamination of underground waters in the Coquivacoa Parish of the Maracaibo Municipality-Zulia State

Wilmer Márquez, Nola Fernández y Williams Cerón

Departamento de Geofísica, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo 4001, Venezuela. E-mail: wmarquez@luz.edu.ve

Abstract

The cartography of the vulnerability of the aquifer mantels is one of the most appropriate alternatives to preserve the quality of the underground waters. She allows differentiating the natural characteristics of the land to protect to the aquifer of the action of multiple pollutants that can infiltrate from the surface, associated to natural phenomena or to the man's activity. In Venezuela, the underground waters occupy a fundamental paper in the population's supply, agriculture and the industry. The presented work evaluates the natural vulnerability of the aquifers in the Parish Coquivacoa of the Municipality Maracaibo, to inclination, of a methodology that calculates the vulnerability index that Index of PATHS has been denominated. This index is obtained starting from the analysis of: Precipitations, Half Aquifer (Depth of the Phreatic Level, Litology of the aquifer), Topography (Slope of the land) and Hydraulic Resistivity of the floor. The whole information was processed using the theory Convolution of Gosh and the algorithms of the Nested Regression and as a result the Parish Coquivacoa was represented to scale 1:5000 that it constitutes the starting point to decide on investigations and monitoring nets to detailed scales, to dictate political of control to the agricultural, industrial, urban activities, and besides evaluating the danger of contamination of the underground waters.

Key words: Ridge regression, PATHS, map of vulnerability, acuifer.

Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo-Estado Zulia

Resumen

La cartografía de la vulnerabilidad de los mantos acuíferos es una de las alternativas más adecuadas para preservar la calidad de las aguas subterráneas. Ella permite 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 Venezuela, las aguas subterráneas ocupan un papel fundamental en el abastecimiento de la población, agricultura y la industria. El trabajo presentado evalúa la vulnerabilidad natural de los acuíferos en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo, a través, de una metodología que calcula el índice de vulnerabilidad que ha sido denominado Índice de PATHS. Este índice es obtenido a partir del análisis de: precipitaciones, medio acuífero (profundidad del nivel freático, litología del acuífero), topografía (pendiente del terreno) y resistividad hidráulica del suelo. Toda la información fue procesada empleando la teoría Convolutiva de Gosh y los algoritmos de la Regresión Anidada y como resultado se representó la Parroquia Coquivacoa a escala 1:5000, que constituye el punto de partida para decidir sobre investigaciones y redes de monitoreo a esca-

las más detalladas, dictar políticas de control a las actividades agrícolas, industriales, urbanas, y además de evaluar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras clave: Regresión anidada, PATHS, mapa de vulnerabilidad, acuíferos.

Introducción

En el mundo 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 [1].

Así mismo, existen al menos 1500 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 abastecimiento.

En Venezuela, las aguas subterráneas ocupan el 16% del volumen total del agua que se consume anualmente para satisfacer necesidades de la actividad económica y social, estas estadísticas reflejan la importancia de proteger este recurso vital [1].

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 necesidad de desarrollar una gestión ambientalmente segura de las aguas subterráneas. Como resultado de esta situación, en Venezuela se está generalizando el uso de técnicas para cartografiar en términos estadísticos, empleando la regresión anidada y el índice de PATHS, la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, como una herramienta de gran utilidad para evaluar cualitativamente y cuantitativamente 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.

Metodología Empleada

El término vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, fue introducido por el hidrogeólogo francés J. Margat a finales de la década de los años 60, basado en el hecho real de que, en cierta medida, el medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie [2].

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 celdas, solo muestra la vulnerabilidad relativa de unas áreas con respecto a otras y no representa 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 [3].

Cabe destacar, 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, 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.

A partir de la información geológica, edafológica, geomorfológica e hidrológica, disponible en la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo (Figura 1), fue desarrollada una metodología que aplica un sistema por rangos ponderados y luego optimizados a través de la regresión anidada, para calcular un índice, que ha sido denominado índice de PATHS, y que resulta ser directamente proporcional a la vulnerabilidad del acuífero [4], a partir de las muestras de aguas subterráneas, seleccionadas y recolectadas en las perforaciones de los dos estudios paramétricos realizados en el Sector La Lucha de la Parroquia Coquivacoa, durante los días 10, 11, 12, 13, 14 y 15 del mes de Enero de 2005, bajo la coordinación del Laboratorio de Geofísica de LUZ y cuyas coordenadas se encuentran en el Sistema Catedral de Maracaibo que se muestran en la Tabla 1.

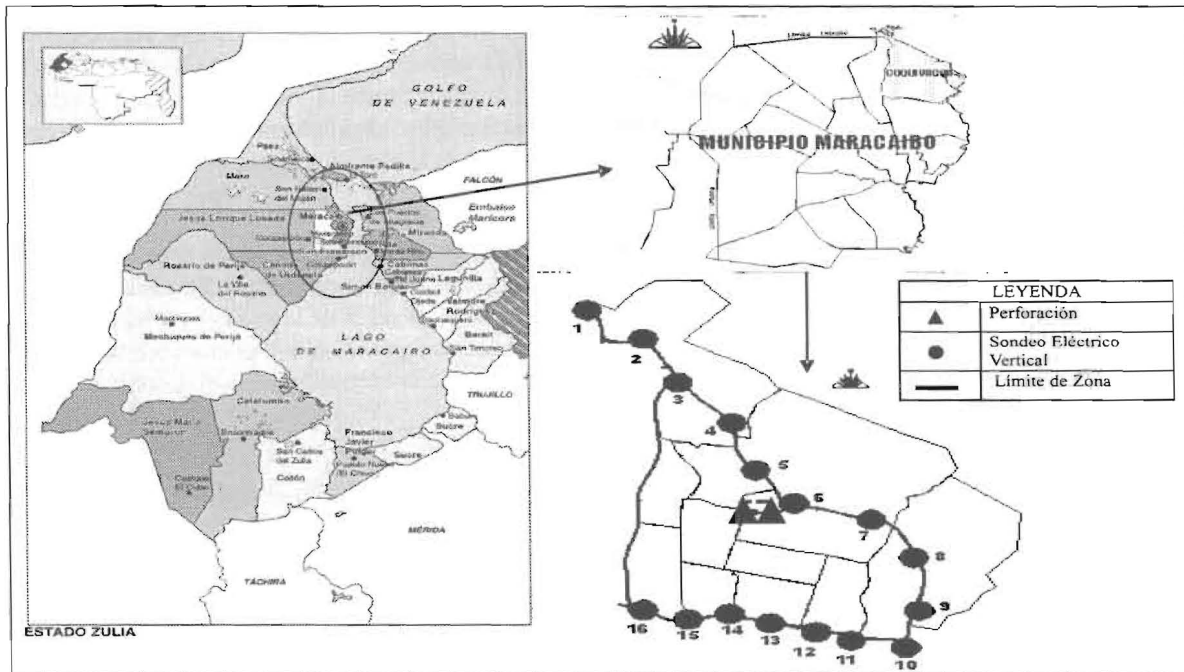


Figura 1. Ubicación geográfica del Municipio Maracaibo y mallado de exploración en la Parroquia Coquivacoa.

Tabla 1
Coordenadas de las perforaciones

| Perforación | Norte (m) | Este (m) |
|-------------|-----------|----------|
| 1 | 207279 | 199226 |
| 2 | 207317 | 199281 |

Es importante destacar que las muestras recolectadas en las perforaciones 1 y 2 del sector La Lucha de la Parroquia Coquivacoa, corresponden a mantos acuíferos ubicados a una profundidad de 35 m, caudal de 20 L/s y con alto contenido de cloruro de sodio. Precisamente a partir de estas dos perforaciones, se definieron los pesos y rangos asignados a las variables de profundidad del agua subterránea (P), litología del acuífero (Lit), precipitaciones (Pp), tectónica (T), pendiente topográfica (Pend.Top) y resistencia hidráulica del suelo (RH) [5], y optimizados mediante la regresión anidada con el objeto de controlar la calidad de la información recolectada en las dos perforaciones y los dieciséis sondeos eléctricos verticales realizados a lo largo de la Parroquia Coquivacoa, tal como se observa en la Figura 1.

VARIABLES EMPLEADAS

A continuación, se definen las variables empleadas para el cálculo del índice de PATHS, cuyos valores de pesos y rangos fueron determinados a partir de las perforaciones ubicadas en el Sector La Lucha, así como, de la ejecución y procesamiento de dieciséis sondeos eléctricos verticales, distribuidos en forma uniforme en la parroquia antes mencionada y optimizados mediante la aplicación de la regresión anidada, según podemos observar en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, con el fin de controlar la calidad de los pesos y rangos asignados a cada una de las variables implícitas en la definición del modelo matemático PATHS.

Así mismo, la asignación de pesos y rangos a cada una de las variables, mediante el procesamiento de los dieciséis sondeos eléctricos verticales, realizados en el área de estudio y optimizados mediante la regresión anidada, se describen en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

Profundidad del agua subterránea (P)

En la Tabla 2 observamos que mientras más profundo se encuentre el nivel estático, mayor es el espesor de la zona no saturada y su ca-

pacidad de atenuar la carga contaminante, estos, en función de los análisis efectuados a las dos perforaciones realizadas en el Sector La Lucha y controlado estadísticamente a través de la regresión anidada, dichos análisis se realizaron empleando el espectrofotómetro de absorción atómica y el Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater (SMEWW 1998).

Precipitaciones (Pp)

En la Tabla 3 observamos que los altos niveles de precipitación pueden disminuir el im-

pacto del agente contaminante, ya sea, diluyéndolo o transportándolo en forma de flujo superficial, disminuyendo la vulnerabilidad del acuífero, en función de los valores tabulados de precipitaciones en la zona estudiada [6].

Litología del acuífero (Lit)

En la Tabla 4 observamos que los fenómenos de difusión y dispersión de los agentes contaminantes dependen de la granulometría, textura, fracturación, porosidad y permeabilidad de las rocas. Esto también influye en el desarrollo de las

Tabla 2
División por Rangos para la profundidad del agua subterránea

| Profundidad del Agua Subterránea (m) | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (m) |
|--------------------------------------|-------|----------|---------------|-------------------------|
| 0-20 | 12 | 0,075 | 0,0014 | $3,124 \times 10^{-14}$ |
| 20-30 | 8 | 0,062 | 0,002 | $2,314 \times 10^{-14}$ |
| > 30 | 2 | 0,070 | 0,003 | $1,214 \times 10^{-14}$ |

Peso asignado: 5 para un R-SQUARE de 0,004%.

Tabla 3
División por intervalos para las precipitaciones

| Precipitaciones (mm) | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (mm) |
|----------------------|-------|----------|---------------|------------------------|
| < 1000 | 12 | 0,068 | 0,02 | $2,112 \times 10^{-9}$ |
| 1000-1200 | 10 | 0,042 | 0,06 | $3,214 \times 10^{-8}$ |
| 1200-1400 | 9 | 0,036 | 0,04 | $4,22 \times 10^{-6}$ |
| 1400-1600 | 8 | 0,028 | 0,03 | $3,142 \times 10^{-8}$ |
| 1600-1800 | 7 | 0,039 | 0,07 | $2,111 \times 10^{-6}$ |
| > 1800 | 6 | 0,040 | 0,09 | $1,432 \times 10^{-4}$ |

Peso asignado: 4 para un R-SQUARE de 0,005%.

Tabla 4
División para las litologías

| Litologías | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (%) |
|--------------------------|-------|----------|---------------|-------------------------|
| Arena con lutita | 12 | 0,036 | 0,03 | $3,122 \times 10^{-18}$ |
| Arenisca con Agua Salada | 9 | 0,026 | 0,04 | $2,144 \times 10^{-16}$ |
| Lutita | 8 | 0,022 | 0,035 | $2,829 \times 10^{-14}$ |
| Arenisca Seca | 6 | 0,019 | 0,06 | $4,344 \times 10^{-12}$ |
| Lutita con Arcilla | 3 | 0,020 | 0,07 | $3,124 \times 10^{-10}$ |

Peso asignado: 3 para un R-SQUARE de 0,009%.

reacciones químicas entre el agua contaminada y la matriz del acuífero. Las rocas que poseen mayor transmisividad hidráulica hacen más vulnerable al acuífero. Cabe destacar que los valores asociados a la litología fueron obtenidos a partir de los análisis realizados en el Laboratorio de Geofísica de L.U.Z., a partir, de los núcleos extraídos en las dos perforaciones realizadas.

Tectónica (T)

En la Tabla 5 se observa que la presencia de fallas en el medio geológico, favorecen el desarrollo de fracturas y esto puede provocar el incremento de la porosidad secundaria y permeabilidad de las rocas, disminuyendo la capacidad de atenuación de agentes contaminantes en la zona no saturada. Al igual que para la variable anterior, estos valores fueron obtenidos sobre la base de los análisis realizados por el Laboratorio de Geofísica de L.U.Z. de los núcleos obtenidos de las perforaciones.

Pendiente topográfica (PendTop)

En la Tabla 6 las pendientes elevadas de la superficie del terreno favorecen las corrientes superficiales y hacen que disminuya la infiltración de los contaminantes [7], en función de la evaluación realizada a las cotas fotogramétricas disponibles para la zona estudiada, proporciona

da por la Dirección de Catastro de la Alcaldía de Maracaibo del vuelo de la ciudad del año 1992.

Resistencia hidráulica del suelo (RH)

Este parámetro cuantifica la resistencia que hace el suelo a la infiltración de un contaminante, expresando la inaccesibilidad hidráulica al acuífero, tal como se muestra en la Tabla 7.

La resistencia hidráulica del suelo fue determinada dividiendo el espesor del suelo entre el drenaje; de esta manera fue posible caracterizar al menos cualitativamente la resistencia hidráulica de los suelos a la infiltración de contaminantes. En la Tabla 7 se especifica el peso asignado a este parámetro y su división por rangos [8], optimizados mediante la regresión anidada.

Procesamiento y optimización

El índice PATHS fue calculado como [9]:

$$\text{PATHS} = 5P + 4Pp + 3Lit + T + \text{PendTop} + 5RH. \quad (1)$$

Los resultados obtenidos mediante el índice de PATHS, fueron optimizados con el método de la regresión anidada (Tabla 8), cuyo fundamento se basa en comparar los datos de campo con un conjunto de valores de laboratorio, tales como, profundidad del manto acuífero, precipitaciones,

Tabla 5
División por rangos por las tectónicas

| Presencia de Fallas | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (%) |
|-------------------------------|-------|----------|---------------|-------------------------|
| Zonas con presencia de fallas | 6 | 0,34 | 0,12 | $2,32 \times 10^{-10}$ |
| Zonas sin presencia de fallas | 0 | 0,42 | 0,38 | $4,132 \times 10^{-12}$ |

Peso asignado: 1 para un R-SQUARE de 0,002%.

Tabla 6
División por rangos para las pendientes topográficas

| Pendiente Topográfica (%) | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (%) |
|---------------------------|-------|----------|---------------|-------------------------|
| < 1 | 12 | 0,08 | 0,15 | $4,129 \times 10^{-12}$ |
| 1-3 | 10 | 0,07 | 0,18 | $5,446 \times 10^{-14}$ |
| 3-7 | 9 | 0,04 | 0,01 | $6,123 \times 10^{-16}$ |
| 7-10 | 5 | 0,03 | 0,23 | $3,444 \times 10^{-12}$ |
| >10 | 3 | 0,07 | 0,07 | $3,987 \times 10^{-11}$ |

Peso asignado: 1 para un R-SQUARE de 0,002%.

Tabla 7
División por rangos para la resistencia hidráulica del suelo

| Resistencia Hidráulica del Suelo | Rango | Kurtosis | Valor Sesgado | Error Medio (%) |
|----------------------------------|-------|----------|---------------|------------------------|
| 2-6 | 10 | 0,124 | 0,08 | $2,44 \times 10^{-9}$ |
| 1-2 | 8 | 0,459 | 0,03 | $4,133 \times 10^{-8}$ |
| 0,6-1 | 5 | 0,314 | 0,03 | $3,180 \times 10^{-6}$ |
| 0,2-0,6 | 3 | 0,554 | 0,01 | $2,314 \times 10^{-6}$ |

Peso asignado: 5 para un R-SQUARE de 0,004%.

Tabla 8
Parámetros de la regresión anidada para el índice de PATHS en la Parroquia Coquivacoa

| | Vulnerabilidad | | | |
|---|--|--|--|--|
| | Baja < 80 | Moderada 80-100 | Alta 100-120 | Extrema > 120 |
| Desviación Estándar | 2,863 | 0,128 | 1,134 | 1,984 |
| Kurtosis | 0,047 | 0,015 | 0,037 | 0,038 |
| Valor Sesgado | 0,843 | 0,343 | 0,259 | 0,297 |
| R-Square (%) | 0,124 | 0,037 | 0,259 | 0,568 |
| Error Absoluto Medio (%) | 0,674 | 0,836 | 0,723 | 0,568 |
| Error Medio Puntual (%) | $1,321 \times 10^{-14}$ | $2,829 \times 10^{-12}$ | $2,622 \times 10^{-12}$ | $1,342 \times 10^{-14}$ |
| Error Medio Puntual (%) | -1,309 | -2,345 | -3,001 | -2,934 |
| Matriz de Correlación | $\begin{bmatrix} 1,000 & -0,6745 \\ -0,6745 & 1,000 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1,000 & -0,6342 \\ -0,6342 & 1,000 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1,000 & -0,5673 \\ -0,5673 & 1,000 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 1,000 & -0,5243 \\ -0,5243 & 1,000 \end{bmatrix}$ |
| Modelo ajustado de la regresión anidada | PATHS: 34,12-0,28* vulnerabilidad | PATHS: 34,18-0,22* vulnerabilidad | PATHS: 34,16-0,20* vulnerabilidad | PATHS: 34,20-0,11* vulnerabilidad |

litología del acuífero, tectónica, pendiente topográfica y resistencia hidráulica del suelo, los cuales, fueron obtenidos a partir de las dos perforaciones realizadas, incorporando variables estadísticas de control [10]. Esto tiene como objeto, determinar mediante un proceso de interpolación, las propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos (Tabla 9) se realizó empleando el espectrofotómetro de absorción atómica y el SMEWW 1998, definiendo con ello un modelo ini-

cial de datos que permite indicar el nivel de ruido en los datos y predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros para sistemas linealmente dependientes (ecuación 2).

El modelo matemático que describe este método es el siguiente [11]:

$$A = \frac{\partial G(P, x)}{\partial P_i} \quad (2)$$

Tabla 9
Propiedades físico-químicas optimizadas de los mantos acuíferos

| | Parámetros de la Regresión Anidada | | | |
|---|--|----------|-------------------------|----------|
| | 5 | | 6 | |
| | ρ (Ω -m) | Prof (m) | ρ (Ω -m) | Prof (m) |
| Datos Geoelectrónicos | | | | |
| Desviación Estándar | 17,861 | 24,570 | 17,848 | 25,376 |
| Kurtosis | 0,074 | 1,029 | 0,050 | 1,048 |
| Valor Sesgado | -0,934 | 0,019 | -0,958 | 0,048 |
| R-square (Ω -m) | 3,153% | | 3,481% | |
| Error Absoluto Medio (Ω -m) | 20,376 | | 28,830 | |
| Error Medio (Ω -m) | 2,132,10 ⁻¹⁵ | | 7,105,10 ⁻¹⁶ | |
| Error Medio Porcentual (Ω -m) | -12,308% | | -21,738% | |
| Modelo Ajustado de la Regresión Anidada (Ω -m) | $\rho = 32,10 - 0,23*Prof$ | | $r = 32,73 - 0,25*Prof$ | |
| Propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos | | | | |
| Parámetros | ALC, B, CA, CL, COND, F, HCO ₃ , K, MG, MN, NA, SO ₂ , SO ₄ , TEMP, ZN, | | | |
| Desviación Estándar (mol) | 1,50 | | | |
| Kurtosis (mol) | 0,05 | | | |
| Valor Sesgado (mol) | 0,39 | | | |
| R-square (mol) | 3,63% | | | |
| Error Absoluto Medio (mol) | 1,21 | | | |
| Error Medio (mol) | -4,98 x 10 ⁻¹⁷ | | | |
| Error Medio Porcentual (mol) | -3,8% | | | |
| Modelo Ajustado de la Regresión Anidada para cada parámetro (mol) | ALC* = 3,57162 - 0,000513412*ALC B* = 3,57162 + 0,00633188*B CA* = 3,57162 - 0,0222643*CA CL* = 3,57162 - 0,0000705953*CL COND* = 3,57162 + 0,0000840001*COND F* = 3,57162 - 0,0407327*F HCO ₃ * = 3,57162 - 0,223895*HCO ₃ K* = 3,57162 - 0,000329895*K MG* = 3,57162 - 0,0264643*MG MN* = 3,57162 + 0,000782623*MN NA* = 3,57162 + 2,01836*NA SIO ₂ * = 3,57162 - 0,142806*SIO ₂ SO ₄ * = 3,57162 + 0,0000674154*SO ₄ TEMP* = 3,57162 - 0,000402146*TEMP ZN* = 3,57162 - 0,00288611*ZN | | | |

$$N = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M = \sigma^2 N \quad (4)$$

$$\Delta G = A\Delta P \quad (5)$$

$$\Delta P = \rho_t - \rho_n \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{(\Delta G)^t N^{-1} \Delta G}{N - M} \quad (7)$$

$$\text{cov}(P) = \sigma^2 (A^t N^{-1} A)^{-1} \quad (8)$$

$$[\text{cor}(P)]_{ij} = \frac{[\text{cov}(P)]_{ij}}{\sqrt{[\text{cov}(P)]_{ii} * [\text{cov}(P)]_{jj}}} \quad (9)$$

donde ρ_1 es la resistividad en la capa 1, ρ_n la resistividad aparente Schlumberger, P el vector de parámetros desconocidos, $G(P, x)$ la resistividad aparente medida, cor la matriz de correlación, cov la matriz de covarianza y σ^2 la varianza residual [12].

Analizando la variabilidad del índice de PATHS, una vez optimizados mediante la Regresión Anidada, la vulnerabilidad en cada celda fue clasificada de la manera como puede verse en la Tabla 8.

Análisis de Resultados

La Figura 2 presenta el mapa de vulnerabilidad de acuíferos obtenido a través del cálculo e interpretación del índice de PATHS y optimizados mediante la regresión anidada. Así mismo, en función de los resultados obtenidos en la Tabla 8, se observó que las zonas más vulnerables se localizan básicamente donde el desarrollo de los suelos es escaso, es decir, donde no existen desarrollos agrícolas organizados, y además, donde la profundidad del nivel freático es pequeña, menor a los 2 m. Así mismo, se concluye que la litología del acuífero, favorece la infiltración y migración de contaminantes desde la superficie hasta las formaciones acuíferas. Al mismo tiempo, el relieve topográfico en algunas zonas del sector Nor-Oeste de la Parroquia, no favorece el predominio de la escorrentía superficial.

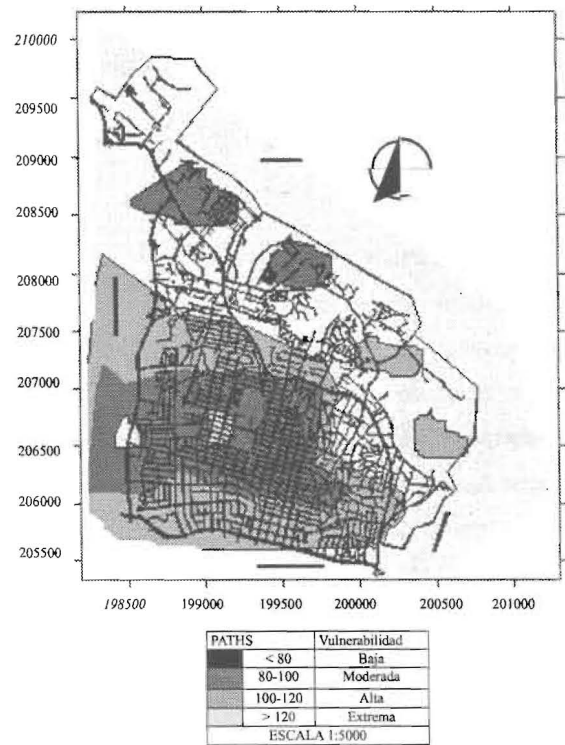


Figura 2. Mapa de vulnerabilidad de acuíferos en la Parroquia Coquivacoa.

En general, se destaca también que las áreas menos vulnerables se localizan en las composiciones litológicas de baja porosidad, en combinación con pendientes topográficas que favorecen la escorrentía superficial de las aguas, como se observa en el sector La Lucha y hacia el Sur-Este de la Parroquia, donde los mantos acuíferos no han sido afectados por los agentes contaminantes, a pesar de la presencia de desarrollos urbanísticos a gran escala en estos sectores.

Cabe destacar, que en las Tablas 8 y 9 se observó el modelo ajustado de la regresión anidada para los diferentes niveles de vulnerabilidad y para cada agente contaminante respectivamente, lo que permite inferir a futuro acerca de las propiedades físico-químicas de los acuíferos en la Parroquia Coquivacoa. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos con el método de la regresión anidada para el procesamiento de datos geoelectrónicos, así como también para la estimación de la calidad del agua (ecuación 9). Estos resultados definen el nivel de ruido en la muestra en 5%, ya que las variables estadísticas: 1) error medio, que está en el intervalo de valores

de $2,132 \times 10^{-15}$ a $7,105 \times 10^{-16}$ para los datos geoelectrónicos, y en $-4,98 \times 10^{-17}$ para las propiedades físico-químicas de los mantos acuíferos; y 2) error medio porcentual, que es de $-3,8\%$ para la calidad del agua, generan un modelo de datos de regresión que permite controlar la calidad de los resultados si se interviene en términos urbanos la parroquia, en función de la pendiente topográfica, litología de los acuíferos y tectónica, así como de las proyecciones de precipitaciones anuales para la zona que disponga el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que la aplicación de la regresión anidada a los resultados obtenidos a partir del índice de PATHS, en la fase de procesamiento e interpretación de datos geoelectrónicos, así como, para el establecimiento de la calidad del agua, en función de sus propiedades físico-químicas (Tabla 4), define un modelo geodinámico que facilita predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros de resistividad, profundidad, caudal, calidad del acuífero, litología, tectónica, precipitación, pendiente topográfica y resistencia hidráulica, permitiendo la elaboración del mapa de vulnerabilidad de la Parroquia Coquivacoa. A su vez, se ha representado gráficamente los valores del índice de PATHS optimizados mediante la regresión anidada con el fin de evaluar la vulnerabilidad de acuíferos en toda la Parroquia Coquivacoa del Municipio Maracaibo a escala 1:5000, que tiene gran valor desde el punto de vista metodológico y práctico. Metodológicamente, esta aplicación demuestra la posibilidad de diseñar mapas como éste a escalas más detalladas y al mismo tiempo se muestran las bondades que brinda la representación cartográfica del índice de PATHS para evaluar la presencia cualitativa y cuantitativa de los agentes contaminantes. Desde el punto de vista práctico el resultado obtenido permite lo siguiente:

- 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 escala más detalladas.

Así mismo, se observó en la Figura 2 que las zonas de vulnerabilidad extrema se encuentran hacia el Nor-Este y Nor-Oeste de la Parroquia, debido a que no existen desarrollos agrícolas organizados y a la presencia de pendientes topográficas que no facilitan el flujo de las aguas superficiales hacia las riberas del Lago de Maracaibo, además de la ubicación de desarrollos habitacionales con drenajes ineficientes que propician la acumulación de las aguas superficiales portadoras de los agentes contaminantes.

Referencias Bibliográficas

1. Hidroven. "El ciclo del agua y la vida", 2005. p. 3.
2. Civita, M.: Assessment of aquifer vulnerability to contamination, "Protezione e Gestione delle acque Sotteranee Metodologie, Technologie e Obiettivi", Marano sul Panaro, v-3, p 39-86, 1990.
3. Foster, S y R, Hirta: Determinación de riesgos de contaminación de aguas subterráneas, CEPIS, Lima, Perú, 1988.
4. Grises J., J.A.A. Hernández, J. Rosario, N. Ferrer, *et al.* Suelos 500000, Una aplicación SIG para los servicios técnicos, la investigación y la docencia especializada, Memorias de Geomática 2002, Ciudad de la Habana, Cuba, 2000.
5. Margat, J.: Groundwater vulnerability, BRGM 68 sgl 198 HYD Orleáns France, 1968.
6. Ministerio del Ambiente. "Boletín" Nº 1. 2ª ed. Editorial Ciencias, 2005. p. 18-20.
7. Taco G. y R. Galarrazaga: 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 Vicias del Agua, Quito, Ecuador, 2002.
8. Van Stempvoort, D. Ewert, L. Wassenaar: AVI: A method for groundwater protection mapping in the prairie, Provinces of Canada, Saskatchewan, 1994.
9. Joseph R.I. Resistivity Inversion with Ridge Regression, Society of Exploration Geophysics, páginas: 798-817, Vol. 40, Nº5, 1975.

10. Hoerl, A.E. and Kennard, R.W. Ridge Regression: biased estimation for nonorthogonal problems, v. 12, 1970.
11. Krot, EM. Agregate formation in soils with special referent to cementing substance. Soil -Sci. Soc, 1946. pg. 27-34.
12. Malan, J. 1981. Aspectos geohidrológicos más salientes de la provincial de la Pampa. Primeras Jornadas Geológicas de la Provincia de la Pampa, fascículo 5, 67-90.

Recibido el 19 de Septiembre de 2005
En forma revisada el 13 de Marzo de 2006