

## Evaluación de la respuesta de acuíferos a escala local mediante la adecuación de un modelo hidrogeoelectrico regional

### Assessing aquifer responses on a local scale adapting regional hydrogeoelectric model

Eugenio Vidal-Mendez<sup>1</sup>, Carlos Alejandro Díaz-Schery<sup>1\*</sup>, Clara Elena Marrero-Fornaris<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guantánamo, Cuba.

<sup>2</sup>Universidad de Holguín, Cuba.

\*Autor para la correspondencia: calejandro.schery@gmail.com

---

#### Resumen

Con base en ecuaciones que establecen relaciones de funcionalidad entre propiedades geoelectricas y parámetros hidrogeológicos de los acuíferos, se presenta un nuevo método que permite modelar el comportamiento de las propiedades hidrogeológicas medias, tanto a escala regional como local; para ello se utilizan valores medios regionalizados de la resistividad eléctrica obtenida por sondeos eléctricos verticales y se aplica el método geoestadístico. Con el método es posible estimar la dirección y velocidad del flujo de las aguas subterráneas, así como la profundidad del techo de los acuíferos artesianos sin recurrir a los métodos tradicionales de perforación y aforo, lo cual tiene un positivo impacto económico y medioambiental.

**Palabras clave:** modelación hidrogeoelectrica; acuíferos; resistividad eléctrica; factor de formación; flujo hidrodinámico.

#### Abstract

A new method based on equations that establish functional relationships between geoelectric properties and hydrogeological parameters that allow modeling the performance of hydrogeological average properties, both at regional and local scale, is presented. Regionalized mean values of electrical resistivity obtained by vertical electrical soundings are used and the

geostatistical method is applied. With this method, it is possible to estimate the velocity and direction of groundwater flow, as well as the depth of the ceiling of artesian aquifers without resorting to traditional drilling and gauging methods, which has a positive economic and environmental impact.

**Keywords:** hydrogeoelectric modeling; aquifers; electrical resistivity; formation factor; hydrogeoelectric flow.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelación de un sistema cualquiera se define como una simplificación de un sistema real mediante abstracciones que permiten evaluar las respuestas de este ante diferentes acciones, en correspondencia con sus condiciones de estado y propiedades internas.

Dada la complejidad de los medios geológicos, y de las formaciones acuíferas en especial, se han desarrollado diferentes modelos para simular y estimar su comportamiento ante diferentes acciones naturales o inducidas por la actividad humana. En tal sentido, el desarrollo de métodos para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos cobra cada vez mayor importancia (Valcarce-Ortega, Rodríguez-Miranda, & Jorge Díaz 2020)

La combinación de los factores naturales y antrópicos que inciden en los recursos hídricos de Cuba, así como el agravamiento de sus impactos como consecuencia del cambio climático, ponen de manifiesto que el tema agua es un elemento determinante en el modelo cubano de sostenibilidad (Díaz 2018).

El modelo hidrogeológico regional desarrollado previamente (Vidal 2010) se fundamenta en las relaciones de funcionalidad existentes entre el flujo eléctrico en los medios porosos saturados y el flujo hidrodinámico de las aguas subterráneas; este modelo permite determinar las propiedades hidrogeológicas medias que caracterizan a un acuífero a escala regional, o de sistema, en diferentes direcciones del espacio (anisotropía) con menor incertidumbre y costo que los métodos hidrogeológicos tradicionales. Con ello se resuelven el problema que introduce el factor de escala en la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos, el problema ambiental que ocasiona el uso de combustible fósil para la perforación y aforos de las calas y pozos, así como el problema inverso de la hidrogeología consistente en obtener las propiedades hidrogeológicas a partir de los datos de los niveles piezométricos para calibrar el modelo.

No obstante, a este importante aporte a la hidrogeología, el modelo a escala regional no permite estimar las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos a escala local, debido a que no toma en cuenta el radio de influencia que se produce durante el bombeo y la relación que éste establece con la velocidad del flujo, el gradiente hidráulico y la resistividad eléctrica del acuífero.

Para resolver esta problemática y con el objetivo de evaluar con la mayor certidumbre posible la respuesta del acuífero en aquellas zonas donde a escala local el comportamiento de su resistividad eléctrica indica sus mayores perspectivas, se plantea aquí un nuevo método derivado del modelo regional propuesto por Vidal (2010), que permite dar solución con la mayor certeza posible y el menor impacto al medio ambiente al problema anteriormente descrito, lo cual es corroborado al aplicarse a un caso real.

El área de estudio pertenece a la parte suroccidental de la Sierra Guaso, en la cuenca graben sinclinal Carrera Larga, localizada entre las Sierras Guaso y Canasta como se aprecia en la Figura 1. Está constituida en su parte más oriental por las aleurolitas y areniscas de la Fm. Maquey, mientras que para la occidental se compone de areniscas, aleurolitas, margas, calizas laminares y conglomerados de la Fm. San Luis. Al norte afloran las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Charco Redondo, las cuales en el área investigada yacen a diferentes profundidades por debajo de las formaciones antes descritas, constituyendo el acuífero artesiano aquí evaluado.



Figura 1. Mapa de ubicación del área de los trabajos.

La región en general y el área de los trabajos, en particular, está caracterizada por un intenso desarrollo tectónico, que sigue dos direcciones

fundamentales: NE-SW y NW-SE que drenan el acuífero libre asociado a las calizas de la Fm. Charco Redondo en la Sierra Guaso (Figura 2).

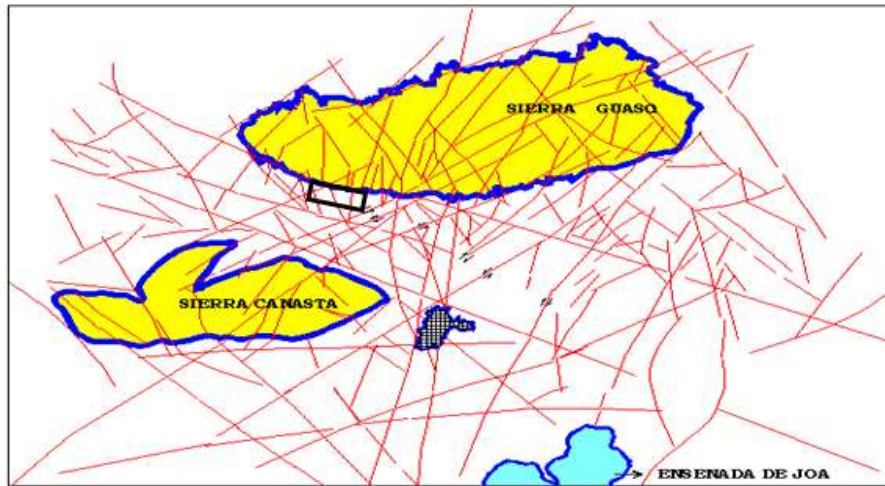


Figura 2. Esquema tectónico regional.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Se partió del modelo hidrogeológico a escala regional o de sistema desarrollado por Vidal (2010). Para demostrar la validez del nuevo modelo se emplearon 86 puntos de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) dispuestos en redes más o menos regulares, orientadas según perfiles longitudinales y transversales a las principales estructuras del área evaluada; ocho calas con igual número de afloramientos de pruebas, dos pozos, dos afloramientos experimentales así como 38 análisis físico-químicos y 15 bacteriológicos de aguas subterráneas.

### 2.2. Métodos

Con la finalidad de recopilar toda la información que reflejara el comportamiento del objeto de estudio y las variables implicadas, así como su problemática en la práctica, tanto en la etapa de acumulación de evidencias como en la predicción de los resultados del modelo, en esta investigación se utilizaron el método empírico-experimental y el hidrogeológico, con fundamentos en la existencia de relaciones de funcionalidad entre las leyes que rigen el flujo eléctrico y el de las aguas subterráneas, debido a la relación que establecen ambos fenómenos con las mismas propiedades físicas del medio acuífero, el cual se apoya en métodos de otras ciencias, como son:

1. Método geofísico de SEV: para obtener los valores de resistividad eléctrica de las capas acuíferas y no acuíferas del área evaluada.

2. Método estadístico: para determinar la medida de la tendencia central y de dispersión de las variables resistividad eléctrica, profundidad del acuífero, resistividad de las aguas subterráneas y de sus propiedades físico-químicas.
3. Método geoestadístico: basado en la teoría de las variables regionalizadas desarrollada por Matheron (1970). Permitted determinar el comportamiento medio de las variables en el espacio, su radio de alcance máximo, varianza espacial, anisotropía, anomalías locales, el área elemental representativa (AER), así como cartografiar con ayuda del programa SURFER, las zonas acuíferas según sus perspectivas.
4. Métodos experimentales, entre los que se encuentran los ensayos de bombeo en pozos, las mediciones del nivel y del régimen de las aguas subterráneas, que permitieron contrastar sus resultados con los obtenidos por el nuevo modelo, así como conocer el comportamiento del acuífero y sus posibles variaciones en el tiempo y el espacio.

### 2.2.1. Modelación hidrogeológica de las propiedades medias del acuífero a escala regional

La modelación de las propiedades físicas e hidrogeológicas medias del acuífero a escala regional o de sistema por el método hidrogeológico se apoyó en el análisis geoestadístico de la resistividad del acuífero y la del agua que lo satura. Para esto se analizó el comportamiento variográfico de la resistividad eléctrica media del acuífero en diferentes direcciones del espacio como muestra el ejemplo de la Figura 3; se determinaron sus radios de alcances máximo ( $R_{A.Max.}$ ) y las longitudes elementales representativas (LER) dentro de las cuales el valor medio de la propiedad estudiada sufre la menor desviación posible.

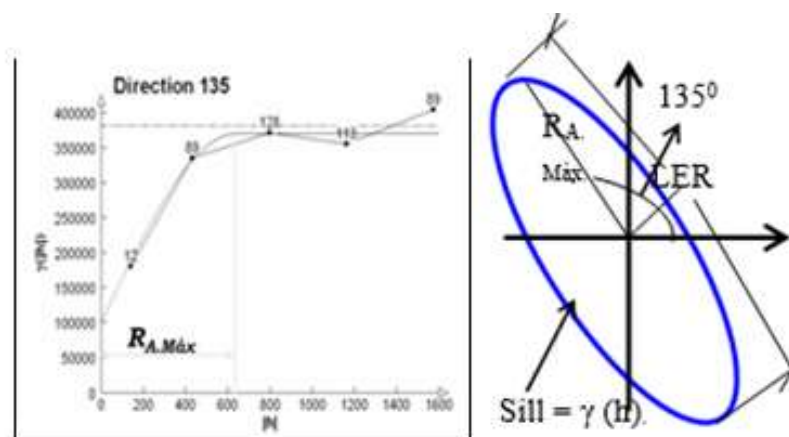


Figura 3. Variograma anisotrópico de dirección  $135^\circ$  y su representación espacial.

Para determinar la longitud elemental representativa (LER) de la sección transversal del acuífero a escala regional o de sistema se emplea la expresión 1:

$$LER=2R_{A.Máx}. \quad (1)$$

Y para el área elemental representativa (AER) de dicha sección, según el tipo de acuífero, las expresiones 2 (acuíferos libres) y 3 (acuíferos artesianos), en las que  $H$  y  $m$  representan sus respectivos espesores medios saturados.

$$AER = LER \times H \quad (2)$$

$$AER=LER \times m \quad (3)$$

Se conoce que el flujo de agua a través de un acuífero está condicionado por la porosidad activa o de flujo ( $\varphi_f$ ), única capaz de dejarlo pasar, por lo que toda el AER de la sección transversal del flujo no participa en la entrega de agua.

Para determinar el espacio poroso efectivo ( $S_p$ ) del AER del acuífero que participa realmente en la filtración se emplea de la expresión 4:

$$S_p=\varphi_f AER \quad (4)$$

De acuerdo con Mendoza & Valle (1996),  $\varphi_f$  es función del factor de formación o de resistividad eléctrica ( $F$ ) del acuífero y de la geometría interna ( $G$ ) de las rocas que lo componen. La  $\varphi_f$  se determina por la siguiente relación:

$$\varphi_f = \left[ \frac{(F-1)}{G} + 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

Siendo  $G=0,887$  para las rocas carbonatadas y  $1,03$  para las arenas.

El factor de formación ( $F$ ) depende directamente de la resistividad de la roca saturada; de acuerdo con Kobr & Ruiz (1989) es afectado por diferentes características y factores del medio natural, entre ellos, su estructura interna, el sistema de conducción y la presencia de arcillas en su interior. En cuanto a la estructura interna, los autores antes citados admiten que el volumen de poros comunicados y saturados de agua en el volumen total de roca (porosidad efectiva) es el factor principal que controla el paso de la corriente eléctrica, y deducen que la ecuación general que caracteriza a el factor de resistividad eléctrica ( $F$ ) en los sedimentos con porosidad intergranular se expresa por la relación:

$$F = a \varphi^{-m} \quad (6)$$

Donde:

$\phi^{-m}$  : es la porosidad efectiva.

$\alpha$  : es el parámetro que representa la geometría interna del medio, el cual es análogo al reportado por Mendoza y Valle (1996) con la letra G.

Una vez conocida la resistividad eléctrica media ( $R_S$ ) que caracteriza a un acuífero y la del agua que lo satura ( $R_W$ ), el factor de formación o resistividad eléctrica puede determinarse por la siguiente expresión de Matheron (1970):

$$F = \frac{R_S}{R_W} \quad (7)$$

Una vez modeladas las propiedades físicas e hidrogeológicas que caracterizan al acuífero a escala regional, se determinan con la menor incertidumbre posible los siguientes parámetros:

- El radio de alcance máximo promedio para dos o más direcciones.

$$R_{A.Máx.P} = \frac{R_{Máx.1} + R_{Máx.2} + \dots + R_{Máx.n}}{n} \quad (8)$$

- La permeabilidad intrínseca media del acuífero.

$$\bar{k} = \frac{1}{F \sigma S_p^2} \quad (9)$$

La permeabilidad intrínseca media del acuífero, como se puede apreciar, es inversamente proporcional al factor de resistividad ( $F$ ), a su grado de consolidación ( $\sigma$ ) y al incremento cuadrático del espacio poroso efectivo que lo caracteriza ( $S_p$ ). Así, para el grado de consolidación de las rocas que conforman los acuíferos, Mendoza & Valle (1996) encontraron que  $\sigma=2$  para formaciones consolidadas y  $\sigma=2,5$  para las no consolidadas.

- La conductividad hidráulica Darciana ( $K_D$ )

$$\bar{K}_D = \bar{k} \frac{g}{\nu} 86400 \quad (10)$$

Donde:

$g$ : es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

$\nu$ : es la viscosidad cinemática del agua (1x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> /s).

Se advierte que  $K_D$  resulta directamente proporcional a la permeabilidad intrínseca del acuífero ( $k$ ), la cual al ser función del factor de resistividad ( $F$ ) (ver ecuación 9), puede expresarse en la forma:

$$K_D = \frac{1}{F \sigma S_p^2} \frac{g}{\nu} \quad (11)$$

O en virtud de (7) como:

$$K_D = \frac{R_w}{R_s \sigma S_p^2} \frac{g}{\nu} \quad (12)$$

Se ha podido demostrar (Vidal 2006) que en las zonas acuíferas donde la resistividad eléctrica ( $R_s$ ) disminuye como consecuencia del incremento de su espacio poroso efectivo ( $S_p$ ), la conductividad hidráulica del acuífero ( $K_D$ ) se incrementa.

- La transmisividad del acuífero

Para calcular la transmisividad hidráulica de un acuífero libre se emplea la expresión 13, mientras la 14 se utiliza para acuíferos artesianos:

$$T = K_D H \quad (13)$$

$$T = K_D m \quad (14)$$

La transmisividad hidráulica puede expresarse en función del factor de resistividad eléctrica ( $F$ ) del acuífero (Vidal 2010) mediante las ecuaciones 15 y 16, para acuíferos libres y artesianos, respectivamente:

$$T_D = \frac{1}{F \sigma S_p^2} \frac{g}{\nu} H \quad (15)$$

$$T_D = \frac{1}{F \sigma S_p^2} \frac{g}{\nu} m \quad (16)$$

O en función de su resistividad eléctrica ( $R_s$ ) y la del agua ( $R_w$ ) que lo satura, a través de las expresiones 17 y 18, para acuíferos libres y artesianos, respectivamente:

$$T_D = \frac{R_w}{R_s \sigma S_p^2} \frac{g}{\nu} H \quad (17)$$



$$T_D = \frac{R_W}{R_S \sigma S_P^2} \frac{g}{v} m \quad (18)$$

Una vez conocida la transmisividad hidráulica de un acuífero, su coeficiente de entrega o almacenamiento medio regionalizado ( $\bar{\mu}_R$ ), importante propiedad que determina su capacidad de almacenar o entregar el agua contenida en ellos, se calcula por la siguiente ecuación:

$$\bar{\mu}_R = \frac{2.246 \bar{T} t_o}{(R_{A.Máx.})^2} \quad (19)$$

Donde  $t_o$  es el tiempo de explotación en régimen cuasi-estacionario. Para los acuíferos artesianos se toma 24 h y para los libres 72 h.

### 2.2.2. Modelación hidrogeoelectrónica de las propiedades medias del acuífero a escala local

Una vez determinados los parámetros hidrogeológicos que caracterizan el acuífero a escala regional o de sistema, se pueden modelar sus propiedades a escala local y predecir el abatimiento en un pozo o grupo de ellos ante un gasto predeterminado, si se toma en consideración que la velocidad del flujo del agua subterránea está dada por las expresiones 20 y 21:

$$\bar{V} = K_d I \quad (20)$$

$$\bar{V} = Q/A \quad (21)$$

En la que la velocidad del flujo es directamente proporcional al gasto (Q) que pasa por el área (A) de la sección transversal del acuífero.

Para una distancia igual al radio de alcance máximo ( $R_{A.Máx.}$ ) el área bruta de la sección transversal por la que atraviesa el flujo, está dada por:

$$A = 2\pi R_{A.Máx.P} \bar{m} \quad (22)$$

Pero se sabe, de la ecuación 4, que el área real de la sección por la que atraviesa el flujo está relacionada con su espacio poroso efectivo ( $S_P$ ), por lo que a escala local la misma puede expresarse como:

$$S_{PL} = \phi_f A \quad (23)$$

De modo que el espacio poroso ( $S_{PL}$ ), drenado por el radio de influencia ( $r_o$ ), durante el bombeo de un pozo en un acuífero con un caudal ( $Q$ ) constante se determina por las ecuaciones 24 (acuífero libre) y 25 (acuífero artesiano):

$$S_{PL} = \varphi_f \left( 2\pi r_o \bar{H} \right) \quad (24)$$

$$S_{PL} = \varphi_f \left( 2\pi r_o \bar{m} \right) \quad (25)$$

Y el radio de influencia ( $r_o$ ), a partir del radio de alcance máximo promedio a escala regional según la siguiente expresión:

$$\bar{r}_o = \frac{\bar{R}_{A.Máx}}{2} \quad (26)$$

A escala local, la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de entrega se determinan entonces por las siguientes expresiones:

$$\bar{K}_L = \frac{1}{F \sigma S_{PL}^2} \frac{g}{\nu} 86400 \quad (27)$$

$$T_L = K_L \bar{m} \quad (28)$$

$$\bar{\mu}_L = \frac{2.246 T_L t_o}{r_o^2} \quad (29)$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contraste entre la resistividad eléctrica las capas supra e infrayacentes permitió modelar con un alto grado de precisión el comportamiento del techo del acuífero artesiano asociado a las calizas de la Fm. Charco Redondo (Tabla 1). Esto permitió seleccionar las zonas menos profundas del acuífero para la ubicación de los pozos. Asimismo, la modelación de su resistividad eléctrica en cuatro direcciones fundamentales del espacio reveló las zonas más perspectivas para la ubicación de los pozos de explotación, de acuerdo con las propiedades hidrogeológicas medias regionalizadas que caracterizan dichas zonas, como se aprecia en la Tabla 2. Al comparar la resistividad media regionalizada del acuífero en general (687 Ohm.m) con los valores medios obtenidos para las diferentes zonas encontradas se puede afirmar que este clasifica como perspectiva para la búsqueda y explotación de aguas subterráneas (693,7 Ohm.m).

Tabla 1. Comportamiento de la profundidad del techo del acuífero y grado de precisión de los estimados

| Direcc. | RAMáx<br>(m) | Profundidad del<br>techo del acuífero. |      |      | Var.<br>(S <sup>2</sup> ) | Log<br>Var. | Error<br>( $\xi$ )<br>$\sqrt{\log \text{ var.}}$ | Precisión.<br>P=100- $\xi$ (%) |
|---------|--------------|--|------|------|---------------------------|-------------|--|--------------------------------|
|         |              | Máx.                                   | Mín. | Med. |                           |             |  |                                |
| E - W   | 1 680        | 240                                    | 40   | 140  | 12480                     | 4,09        | 2,02   | 98                             |
| N - S   | 640          | 260                                    | 30   | 145  | 9600                      | 3,98        | 1,99   | 98                             |
| Prom    | 1 160        | 250                                    | 35   | 142  | 11 040                    | 4,04        | 2,01   | 98                             |

Tabla 2. Resistividad media regionalizada del acuífero y del factor de formación en diferentes direcciones del espacio por zonas perspectiva

| Direcc.      | R <sub>s</sub><br>(Ohm.m) | Resistividad media regionalizada<br>del acuífero por Zonas<br>perspectivas. (Ohm.m) |       |              |                | R <sub>w</sub><br>(Ohm.m) | F <sub>Med.</sub> |
|--------------|---------------------------|---|-------|--------------|----------------|---------------------------|-------------------|
|              |                           | Poco<br>Persp   | Persp | Muy<br>Persp | Valor<br>Medio |                           |                   |
|              |                           | E - W   | 525   | -            | 675            |                           |                   |
| N - S        | 750                       | 1200  | 700   | 250          | 716.7          | 27.3                      | 26.2              |
| Prom.        | 637                       | 1200  | 687.5 | 250          | 612.6          | 27.3                      | 21.5              |
| NE -SW       | 675                       | 1100  | 700   | 275          | 691.7          | 27.3                      | 25.3              |
| SW -NE       | 800                       | 1450  | 700   | 262.5        | 804.2          | 27.3                      | 29.5              |
| Prom.        | 737                       | 1275  | 700   | 262.5        | 804.2          | 27.3                      | 27.4              |
| MED.<br>GEN. | 687                       | 1237.5  | 693.7 | 256.2        | 680.25         | 27.3                      | 24.9              |

De acuerdo con los resultados del valor medio regionalizado del coeficiente de entrega ( $\mu_R$ ) y el obtenido para las diferentes zonas perspectivas que se muestran en las Tablas 3 y 4, el área investigada clasifica también como perspectiva.

Tabla 3. Valores medios de las propiedades físicas e hidrogeológicas regionalizadas

| Media<br>General | F    | $\varphi_f$ | R <sub>A. Max.</sub><br>(m) | S <sub>p</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | k<br>(m <sup>2</sup> ) | K<br>(m/d) | T<br>(m <sup>2</sup> /d) | $\mu_R$ |
|------------------|------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------|--------------------------|---------|
|                  | 25.2 | 0.036       | 1185                        | 4977                                | 8.0 x10 <sup>-10</sup> | 678.9      | 40 734                   | 0.065   |

Tabla 4. Comportamiento de la transmisividad y coeficiente de entrega medio regionalizado del acuífero en diferentes direcciones del espacio por zonas perspectivas

| Dirección     | Poco perspectiva             |         | Perspectiva                  |         | Muy Perspectiva              |         |
|---------------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|
|               | $T_R$<br>(m <sup>2</sup> /d) | $\mu_R$ | $T_R$<br>(m <sup>2</sup> /d) | $\mu_R$ | $T_R$<br>(m <sup>2</sup> /d) | $\mu_R$ |
| E-W           | -                            | -       | 52788                        | 0.017   | 14236                        | 0.046   |
| N-S           | 5706                         | 0.004   | 9783                         | 0.034   | 27342                        | 0.096   |
| Media         | 5706                         | 0.004   | 31285.5                      | 0.025   | 20789                        | 0.035   |
| NE-SW         | 88854                        | 0.43    | 129936                       | 0.64    | 329346                       | 1.62    |
| SW-NE         | 80856                        | 0.44    | 167712                       | 0.71    | 468714                       | 2.57    |
| Media         | 86652                        | 0.45    | 146292                       | 0.76    | 390108                       | 2.02    |
| Media General | 22662                        | 0.036   | 40416                        | 0.065   | 109206                       | 0.21    |

Por otra parte la modelación a escala local reveló que las propiedades físicas e hidrogeológicas del acuífero, al igual que en el modelo regional, presentan un comportamiento anisotrópico en el espacio, estando caracterizado el tramo evaluado por valores medios de porosidad activa, transmisividad hidráulica y coeficiente de entrega de: 0,035, 4 128 m<sup>2</sup>/d y 0.026, respectivamente, para un radio de influencia medio de 592.5 m (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de la modelación de las propiedades media del acuífero a escala local

| Direcc.   | $R_{A.Max.}$<br>(m) | $r_o$<br>(m) | $\phi_f$ | $A$<br>(m <sup>2</sup> ) | $S_{pL}$<br>(m <sup>2</sup> ) | $F$  | $K_L$<br>(m/d) | $T_L$<br>(m <sup>2</sup> /d) | $\mu_L$ |
|-----------|---------------------|--------------|----------|--------------------------|-------------------------------|------|----------------|------------------------------|---------|
| Med. Gen. | 1185                | 592.5        | 0.035    | 446735                   | 15636                         | 25.2 | 68.8           | 4128                         | 0.026   |

Para validar el modelo a escala local, los resultados fueron comparados con las pruebas de aforos realizadas en el área y otras zonas asociadas al mismo acuífero. Los resultados que se muestran en la Tabla 6 indican que el error inducido por este nuevo método al estimar las principales propiedades hidrogeológicas que caracterizan al acuífero resulta mínimo comparado con los de las pruebas de aforos.

Tabla 6. Comparación entre las propiedades hidrogeológicas medias obtenidas por métodos de aforos de pruebas y el nuevo modelo

| Método Tradicional (Aforo) |       |           | Método Hidrogeoelectrico a Escala Local |                           |         |           |
|----------------------------|-------|-----------|---|---------------------------|---------|-----------|
| $T$ (m <sup>2</sup> /d)    | $\mu$ | $r_o$ (m) | $\phi_f$                                | $T_L$ (m <sup>2</sup> /d) | $\mu_L$ | $r_o$ (m) |
| 4142.4                     | 0.036 | 600       | 0.035                                   | 4128                      | 0.026   | 592.5     |

### 3.1. Factibilidad económica y medioambiental

Una importante contribución de este nuevo método a la preservación del medio ambiente lo constituye la reducción del consumo de combustibles fósiles durante las investigaciones, si se compara con la metodología tradicional. De acuerdo con investigaciones previas (Vidal 2010) este importante portador energético, causante de la emisión de grandes volúmenes de gases de efecto invernadero durante su refinación, se reduce notoriamente (64.4%) al emplear este método, lo que implica consumir 16 234 L de combustible menos, con el consiguiente ahorro de divisas.

### 4. CONCLUSIONES

El modelo aquí presentado permite:

- Representar la realidad del acuífero de una manera más simplificada y precisa que los modelos más avanzados conocidos en la actualidad.
- Resolver por primera vez el problema inverso de la hidrogeología sin recurrir a los datos de los niveles piezométricos del acuífero para la calibración del modelo.
- Abaratar los costos de las investigaciones por concepto de trabajos de campo y gabinete en más de un 75% como promedio, respecto a la metodología tradicional.
- Reducir en un 59%, aproximadamente, los tiempos de ejecución y los costos de los trabajos con respecto a la metodología tradicional
- Reducir el consumo de combustible fósil y en consecuencia la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero.

### 5. REFERENCIAS

- Díaz, J. 2018: El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad (Vol. 34). Cuba.
- Kobr.M, & Ruiz.J. 1989: Métodos geofísicos de pozos. La Habana: Editorial ISPJAE.
- Matheron, G. 1970: La teoría de las variables regionalizadas y sus aplicaciones. Cuadernos del centro de morfología matemática de fontainebleu. (Vol. 5). (M. 2. Alfaro, Trad.) París: Fascículo.
- Mendoza, G., & Valle.V. 1996: Modelos petrofísicos para la descripción de Yacimientos fracturados. México: Instituto Politécnico Nacional. Unidad Ticomán.
- Rodríguez, C. 1995: Resistividad eléctrica específica de las rocas. (Vol. VIII).

- Valcarce-Ortega, R. M., Rodríguez-Miranda, W. R., & Jorge Díaz, Z. 2020: Aplicación de parámetros geoelectrónicos en el estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 36(4): 390-403.
- Vidal, M.E. 2010: Calculo de la conductividad hidráulica media regionalizada de los acuíferos a partir de su resistividad eléctrica. Validación práctica. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas. Cuba.: I.S.M.M de Moa.
- Vidal, M.E. 2006: Un nuevo método para determinar la conductividad hidráulica media de acuíferos cársicos a partir de la resistividad eléctrica. Estudio de caso. Memorias VIII Congreso Internacional de Ingeniería hidráulica. Isla de la Juventud. Cuba.

## Información adicional

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

### Contribución de los autores

EVM: Dirección de la investigación y su diseño; procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación; redacción y revisión del manuscrito original y su versión final. CADS: Colaboró con el diseño de la investigación. Asesoró en el procesamiento de los datos. Participó en la revisión del informe final. CEMF: Trabajó en el procesamiento, análisis e interpretación de los datos; revisión y aprobación de la versión final.

### ORCID

EVM, <https://orcid.org/0000-0002-4748-1724>

CADS, <https://orcid.org/0000-0002-8757-4810>

CEMF, <https://orcid.org/0000-0001-9417-7234>

Recibido: 03/12/2020

Aceptado: 22/09/2021