

## Agua subterránea: parámetros óptimos del algoritmo evolución y mezcla de complejos

Rubens Aguilera Frómeta

e-mail: [raguileraf92@ahabana.co.cu](mailto:raguileraf92@ahabana.co.cu)

Empresa de Acueducto y Alcantarillado Aguas de La Habana, La Habana, Cuba.

MSc. Lemuel Carlos Ramos Arzola

e-mail: [lemuelcarlosra@gmail.com](mailto:lemuelcarlosra@gmail.com)

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ing. Mecánica y Eléctrica, Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, México.

### RESUMEN

El objetivo de este estudio es la obtención de los parámetros algorítmicos que garanticen un rendimiento óptimo del algoritmo evolución y mezcla de complejos (shuffled complex evolution con sigla SCE) mediante la calibración de un acuífero hipotético y una metodología recomendada en la literatura. Se utilizó AQÜIMPE como modelo de simulación que actualmente se encuentra en su versión WinAQE. Se hizo un análisis de cada parámetro óptimo en cada escenario estudiado y a partir de la obtención de estos parámetros algorítmicos se realizó la calibración del acuífero real Cuentas Claras (provincia Granma, Cuba), permitiendo comparar las cargas simuladas obtenidas en trabajos anteriores. Los resultados de la presente investigación representan mejor el comportamiento hidrodinámico del acuífero real que los presentados en una investigación previa.

**Palabras clave:** algoritmo shuffled complex evolution, AQÜIMPE, calibración, parámetros algorítmicos.

## Groundwater: optimal parameters of the algorithm shuffled complex evolution

### ABSTRACT

The aim of this study is to obtain the algorithmic parameters that guarantee an optimal performance of the algorithm shuffled complex evolution (SCE) through the calibration of one hypothetical aquifer and a recommended methodology in the literature. AQÜIMPE is used as the simulation model which actually can be found in his WinAQE version. An analysis of each optimal parameter was made on each studied scenary and after obtaining each of these algorithmic parameters a calibration of the real Cuentas Claras aquifer (Granma province, Cuba) was realized, allowing to compare with the simulated loads obtained on previous works.

**Keywords:** shuffled complex evolution algorithm, AQÜIMPE, calibration, algorithmic parameters.

## INTRODUCCIÓN

Según Cabrera (2009), el manejo controlado del agua en un país como Cuba constituye un reto para todos los profesionales que trabajan en ese sentido, especialmente cuando las fuentes de este recurso son acuíferos subterráneos, pues los mismos almacenan (Hernández et al. 2001) cerca de un 30% del potencial aprovechable total del país.

Por tanto, el conocimiento, protección y explotación racional de estas fuentes es un elemento vital y de primer orden para el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, siendo la modelación matemática del agua subterránea la principal técnica capaz de darle solución a esta problemática.

Desde mediados de la década de los ochenta se dio en Cuba un importante salto cualitativo referente a la modelación matemática del agua subterránea con la creación del paquete de programas AQÜIMPE. Esta tecnología está equipada con un módulo capaz de realizar el proceso de calibración de los parámetros hidrogeológicos de manera automática. Para esto se utiliza al algoritmo Evolución y Mezclas de Complejos (Shuffled Complex Evolution), el cual ha sido aplicado con éxito al problema inverso del flujo de agua subterránea. AQÜIMPE resuelve la ecuación bidimensional impermanente de las aguas subterráneas a través del método de los elementos finitos (MEF), utilizando como elemento de discretización el triángulo cuadrático.

Una de las principales características del algoritmo SCE es que trabaja modificando una población de soluciones en lugar de una sola solución, como en el caso de los algoritmos tradicionales, siendo capaz de explorar diferentes áreas del espacio de búsqueda al mismo tiempo. Por tanto, las probabilidades de quedar atrapado en óptimos locales son mucho menores que las de los algoritmos tradicionales y puede ser considerado entonces un procedimiento de optimización global (Gómez 2008).

El algoritmo híbrido Shuffled Complex Evolution (SCE) trata de combinar las características ventajosas de la evolución competitiva de los algoritmos genéticos con los métodos de búsqueda local. Es imprescindible seleccionar los parámetros más eficientes para alcanzar el óptimo global, con un costo computacional relativamente menor.

El algoritmo SCE se encuentra basado en una síntesis de cuatro conceptos que han tenido probado éxito en la optimización global: combinación de aproximaciones aleatorias y determinísticas, el concepto de clustering, el concepto de una evolución sistemática de un complejo de puntos extendiendo el espacio en la dirección de perfeccionamiento global y el concepto de evolución competitiva. En la actualidad existen diversos estudios que demuestran la eficiencia de este algoritmo entre los que pueden citarse Duan et al. (1992) y Duan et al. (1993).

Duan et al. (1994) plantean que la efectividad y eficiencia del algoritmo SCE es sensible a la selección de los parámetros algorítmicos. Además, aclaran que los parámetros recomendados son independientes del problema que resolvieron (calibración de un modelo hidrológico lluvia - escurrimiento) pero como cada problema es diferente, entonces se deben elegir cuidadosamente los parámetros a utilizar. Asimismo, sugieren comenzar la investigación empleando los parámetros recomendados y a partir de los mismos realizar el ajuste para obtener los parámetros óptimos del problema que se esté resolviendo.

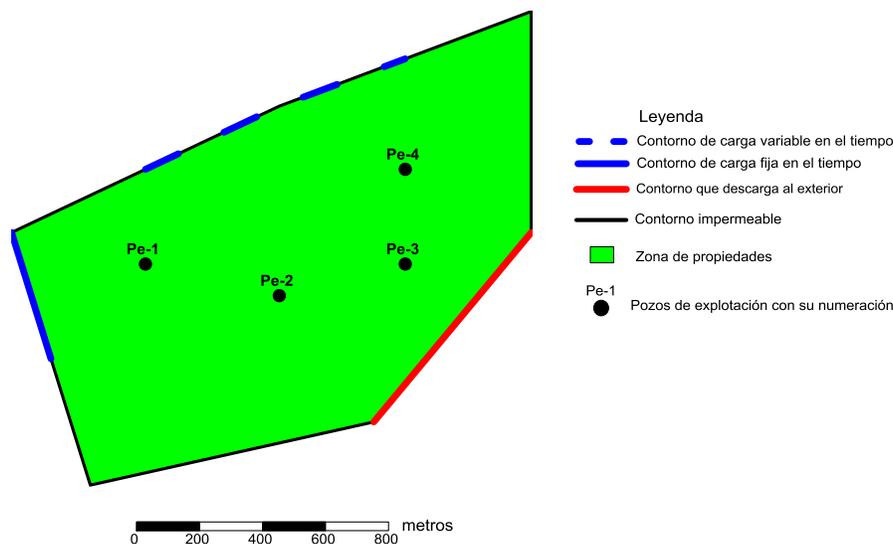
La obtención de parámetros algorítmicos que produzcan un rendimiento óptimo en la calibración de modelos de acuíferos, será tema fundamental de la presente investigación, ya que en la comunidad científica cubana existe cierto desconocimiento en la variación de los parámetros del algoritmo SCE, ante el problema inverso del flujo de agua subterránea.

## OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ALGORÍTMICOS QUE GARANTIZAN UN RENDIMIENTO ÓPTIMO DEL ALGORITMO SCE

En esta sección se presenta un caso de estudio hipotético extraído de Martínez et al. (2000) que consiste en un acuífero confinado homogéneo sometido a varios estímulos. Se realizó la simulación utilizando el modelo AQUIPE y se llevó a cabo la calibración mediante el algoritmo SCE. El objetivo de esta sección es la estimación de los parámetros óptimos del SCE dependiendo de la cantidad de propiedades a ser optimizadas (Aguilera 2016).

### Modelo conceptual

Se presenta un acuífero confinado de aproximadamente 1,5 km<sup>2</sup> de área, sujeto a las siguientes condiciones de contorno: un contorno de carga conocida fija en el tiempo, un contorno de carga variable en el tiempo y un contorno que descarga al exterior, los restantes límites se consideran impermeables (figura 1). El sistema acuífero presenta una zona de propiedades hidrogeológicas y cuatro pozos de bombeo. Además, el acuífero recibe una recarga en planta, asociada con una porción de la lluvia en el área. La simulación se realizó de forma impermanente durante 6 meses con intervalos de tiempo de 30 días (Aguilera 2016).



**Figura 1. Acuífero de estudio** (Aguilera 2016)

El acuífero presenta dos entradas de flujo a través del contorno que contiene la carga fija durante el período de simulación y a través del contorno variable en el tiempo. También el acuífero presenta descargas de flujo a través el contorno de descarga al exterior (Aguilera 2016).

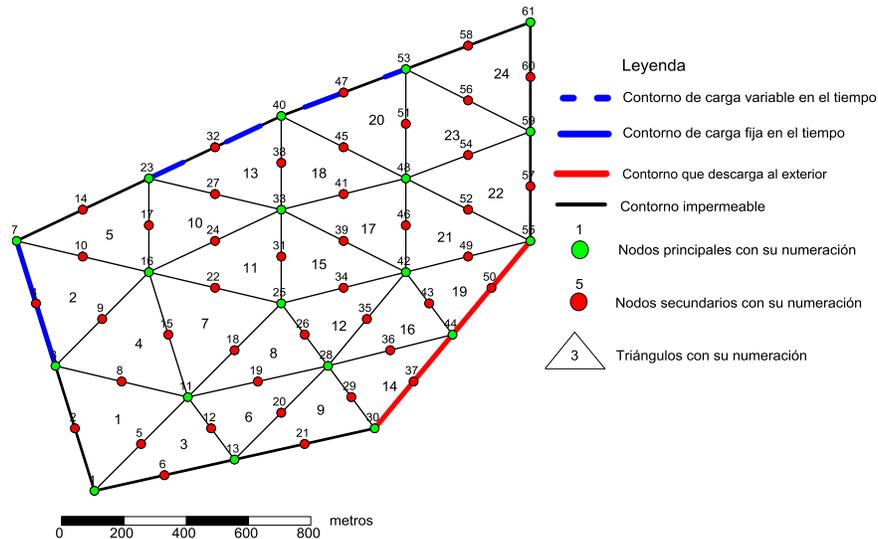
### Discretización

En la figura 2 se muestra la discretización del área del acuífero hipotético, donde la malla mostrada está compuesta por 24 elementos (triángulos) y 61 nodos (vértices y centros de cada lado de los triángulos). El caso de estudio presenta una única zona de propiedades, por tanto, cada triángulo contiene las mismas propiedades hidrogeológicas (Aguilera 2016).

### Diseño del estudio experimental

El diseño que se presenta es similar al empleado por Duan et al. (1994). Este diseño experimental pretende medir el rendimiento del algoritmo SCE a partir de la calibración de los parámetros hidrogeológicos del acuífero, mediante la variación óptima de los parámetros algorítmicos del SCE: el número de complejos ( $p$ ), el número mínimo de complejos ( $p_{mín}$ ), el número de pasos de evolución en cada complejo ( $\beta$ ), el número de descendencia en cada

subcomplejo ( $\alpha$ ), el número de puntos en cada complejo ( $m$ ), el número de puntos en cada subcomplejo ( $q$ ). El modelo del acuífero consta de 2 hasta 48 parámetros a calibrar (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento), donde la tabla 1 muestra el intervalo de propiedades para la calibración del acuífero. Se adoptan como parámetros verdaderos (óptimo global): conductividad hidráulica  $K_D = 500$  m/d. y coeficiente de almacenamiento  $S = 0,0001$ .



**Figura 2. Discretización del sistema para el modelo AQÛIMPE (Aguilera 2016)**

**Tabla 1. Intervalo de propiedades para la calibración**

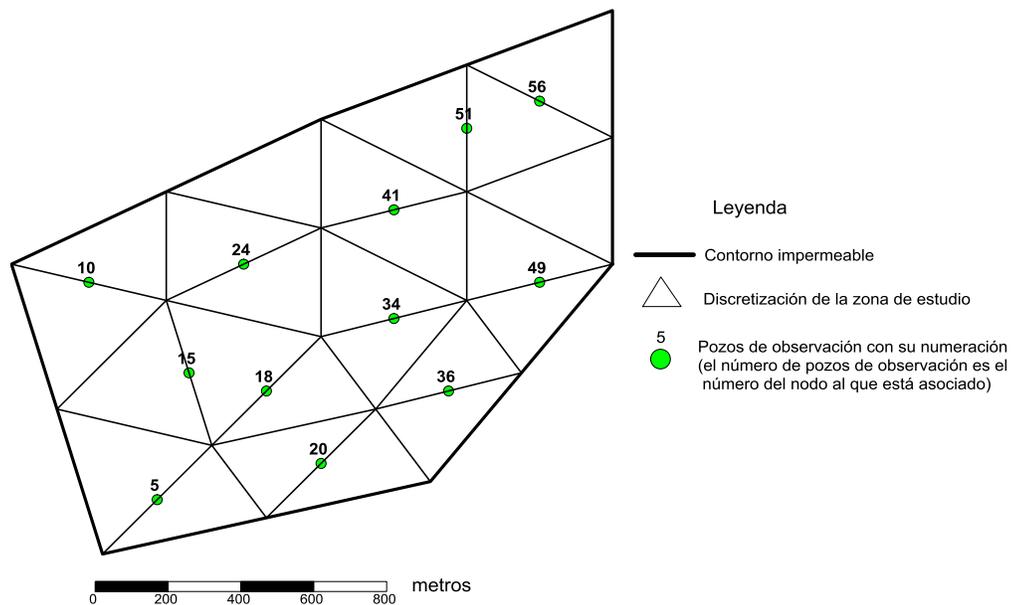
$S$ mínimo	$S$ inicial	$S$ máximo	$K_D$ mínima (m/día)	$K_D$ inicial (m/día)	$K_D$ máxima(m/día)
0,0001	0,001	0,001	10	505	1000

Se realizó la simulación durante un período de 6 meses con (paso de tiempo mensual) y se seleccionaron las cargas simuladas de 12 nodos de la malla. Las cargas de estos nodos son consideradas como los niveles observados para el período de calibración. Existen dos criterios de paradas, si el mejor valor de la función objetivo es menor o igual que  $10^{-3}$  se considera esta ejecución como una corrida exitosa, y si excede un número máximo de iteraciones entonces la corrida no es exitosa. Ver figura 3 y tabla 2.

Se emplean los siguientes criterios para medir el rendimiento del algoritmo SCE: (a) NCE, número de corridas exitosas de 10 ejecuciones, (b) NPEFO, número promedio de evaluaciones de la función objetivo en las corridas exitosas. NCE brinda una medida de la efectividad y NPEFO describe la eficiencia. Cuando un parámetro del algoritmo es seleccionado para ser probado, el resto de los parámetros del algoritmo permanece en sus valores implícitos o con otros valores que se especifican en el texto. Para este estudio, se trabajó según recomendaciones de Duan et al. (1994) seleccionando los parámetros de la siguiente manera:  $p \geq 1$ ,  $q = \beta = m$ ,  $m = 2 * n + 1$  siendo  $n$  el número de propiedades hidrogeológicas a calibrar.

**Tabla 2. Cargas observadas en el tiempo**

H(m)	Tiempo (mes)							
Nodos	x (m)	y (m)	1	2	3	4	5	6
5	950	650	84,2	85,76	86,27	85,38	88,72	85,34
10	763	1250	87,23	89,33	88,64	88,85	89,83	88,48
15	1038	1000	82,53	83,92	84,49	83,56	86,9	83,39
18	1250	950	78,53	80,2	81,5	79,7	85,13	79,69
20	1400	750	75,94	77,57	79,27	77,24	83,91	77,57
24	1188	1300	83,24	83,01	84,12	83,1	86,23	82,69
34	1600	1150	72,57	75,68	76,84	74,93	81,93	75,03
36	1750	950	65,07	72,65	72,23	71,14	79,7	71,67
41	1600	1450	79,72	80,28	81,33	80,26	84,34	79,92
49	2000	1250	67,69	73,12	73,21	72,19	79,74	72,58
51	1800	1675	82,52	83,36	83,54	83,35	85,73	82,71
56	2000	1750	81,37	81,75	82,43	81,91	85,09	81,48



**Figura 3. Ubicación de los pozos de observación**

### Calibración del acuífero hipotético

A continuación, se calibra el acuífero hipotético con SCE para 5 escenarios. Cada escenario es un conjunto de grupos de propiedades (GP) determinado, y cada GP tiene dos propiedades hidrogeológicas a calibrar (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento).

#### Primer escenario

Este escenario presenta un GP y se calibran dos propiedades hidrogeológicas. Ver figura 4.

#### Segundo escenario

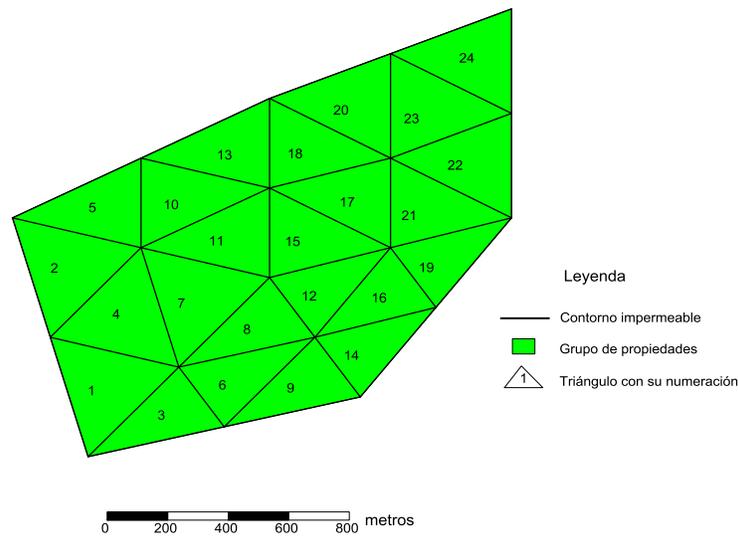
Este escenario presenta dos GP, por lo que se calibraron cuatro propiedades hidrogeológicas, es decir dos por cada propiedad hidrogeológica. Ver figura 5.

#### Tercer escenario

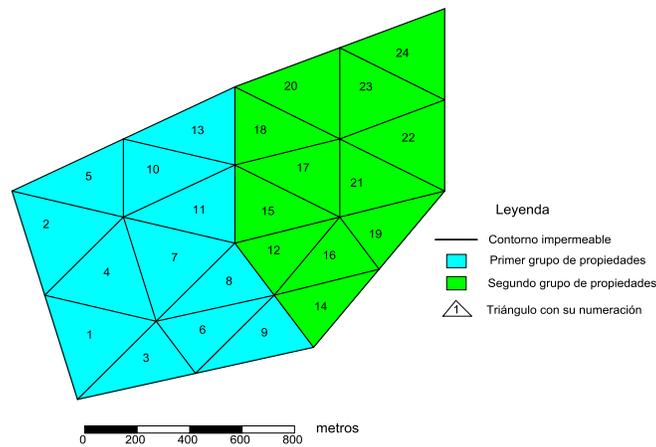
Este escenario presenta cuatro GP, por lo que se calibraron ocho propiedades hidrogeológicas, es decir cuatro por cada propiedad hidrogeológica. Ver figura 6.

### Cuarto escenario

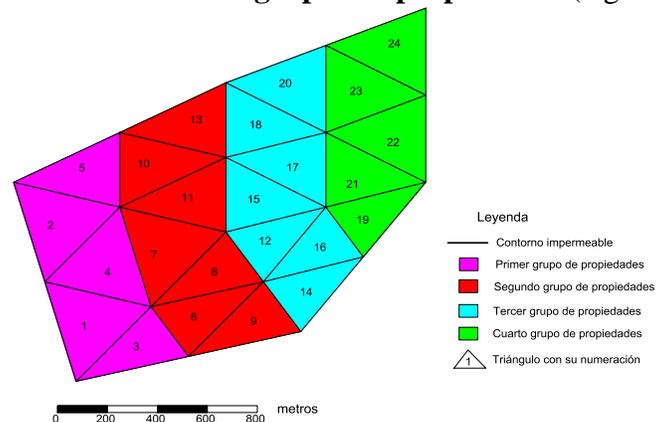
Este escenario presenta ocho GP, por lo que se calibraron dieciséis propiedades hidrogeológicas, es decir ocho por cada propiedad hidrogeológica. Ver figura 7.



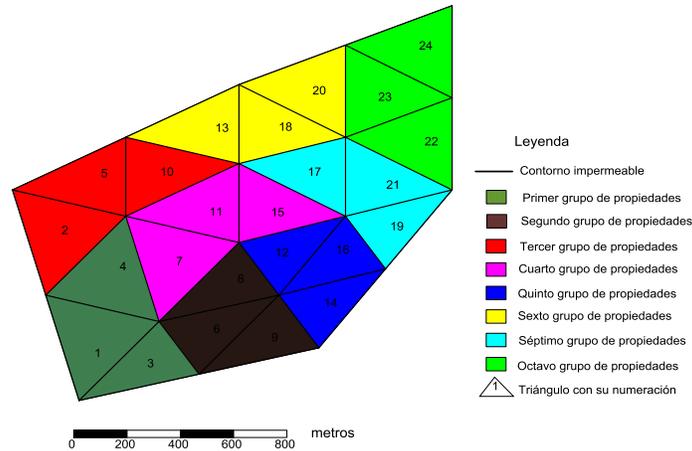
**Figura 4. Escenario 1: un grupo de propiedades (Aguilera 2016)**



**Figura 5. Escenario 2: dos grupos de propiedades (Aguilera 2016)**



**Figura 6. Escenario 3: cuatro grupos de propiedades (Aguilera 2016)**



**Figura 7. Escenario 4: ocho grupos de propiedades (Aguilera 2016)**

**Quinto escenario**

Este escenario presenta veinticuatro GP, por lo que se calibraron cuarenta y ocho propiedades hidrogeológicas, es decir veinticuatro por cada propiedad hidrogeológica. Ver figura 8.

**Resultados de la calibración empleando al algoritmo SCE**

Se obtuvieron los parámetros óptimos del algoritmo SCE obtenidos a partir de los escenarios estudiados, teniendo en cuenta NCE, NPEFO, tiempo, valor de la función objetivo, y los resultados de las propiedades calibradas. Por último, destacar que el peso mayor para definir la solución óptima está en que las propiedades calibradas estuvieran lo más cerca posible de las propiedades óptimas y en el menor valor de la función objetivo (ver tabla 3).

**Análisis de cada parámetro óptimo en cada escenario estudiado**

El rendimiento del algoritmo SCE en el tercer escenario y en el quinto escenario resultó ser efectivo y eficiente.

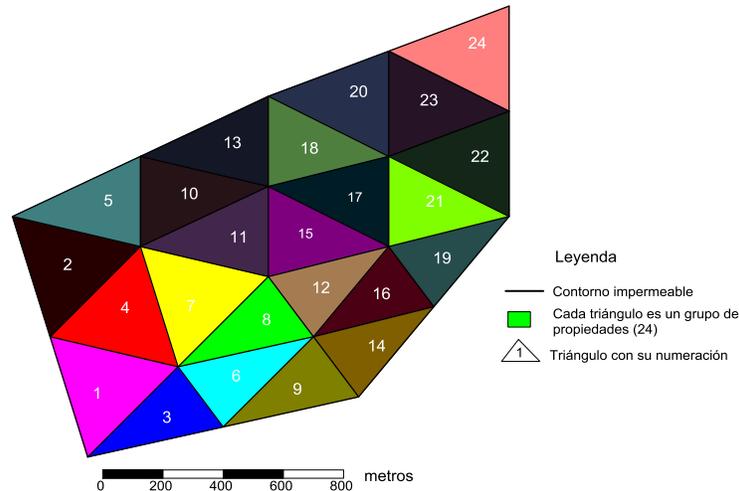
En el primer escenario el rendimiento del algoritmo resultó ser efectivo y eficiente, sin embargo, el valor de  $p$  reflejó ser efectivo pero no eficiente.

En el cuarto escenario el rendimiento del algoritmo resultó ser efectivo y eficiente, sin embargo, el valor de  $m$  reflejó ser efectivo pero no eficiente.

En el segundo escenario para los valores de  $p$  y  $q$  respectivamente el rendimiento del algoritmo resultó ser efectivo y eficiente, sin embargo, para los valores de  $m$  y  $\beta$  respectivamente su rendimiento reflejó ser efectivo pero no eficiente.

**Tabla 3. Resultados de los parámetros óptimos del algoritmo SCE en función del número de propiedades a calibrar**

Propiedades	$p$	$q$	$m$	$\beta$
2	5	3	10	2
4	1	9	10	15
8	1	17	17	17
16	1	33	50	50
48	1	97	97	97



**Figura 8. Escenario 5: veinticuatro grupos de propiedades (Aguilera 2016)**

## COMPARACIÓN DE CARGAS SIMULADAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA APLICACIÓN DEL SCE CON LOS PARÁMETROS ALGORÍTMICOS ÓPTIMOS EN UN MODELO REAL

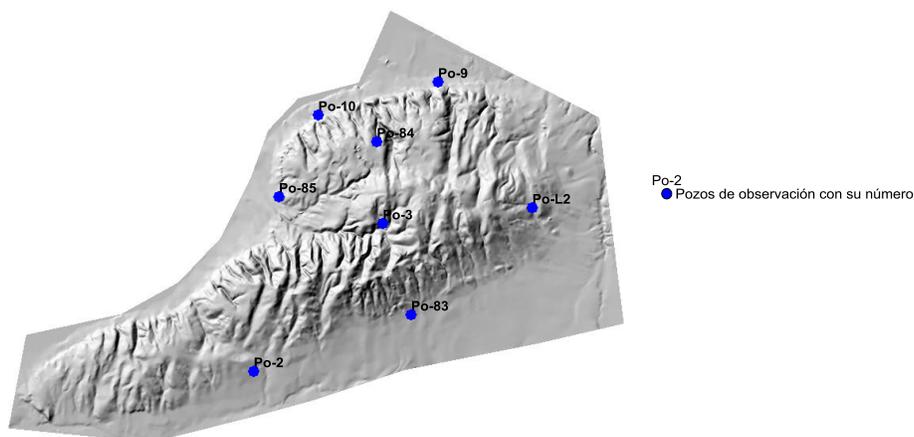
Esta sección se dirige hacia una comparación entre las cargas simuladas obtenidas por Ramos (2012) y las cargas simuladas obtenidas por Aguilera (2016) a partir de la calibración del acuífero Cuentas Claras empleando el algoritmo SCE con los parámetros algorítmicos óptimos obtenidos anteriormente.

### Modelo conceptual de Cuentas Claras

Se procedió en una primera variante según Ramos et al. (2014), a definir el área del modelo.

### Discretización

Según Ramos et al. (2014), la discretización o “triangulación” del área se realizó atendiendo a: los mapas de propiedades hidrogeológicas, ubicación de los pozos de bombeo y de observación (ver figura 9), límites del área a modelar y zonas de infiltración por cada tipo de suelo.



**Figura 9. Ubicación de los pozos de observación (Aguilera 2016)**

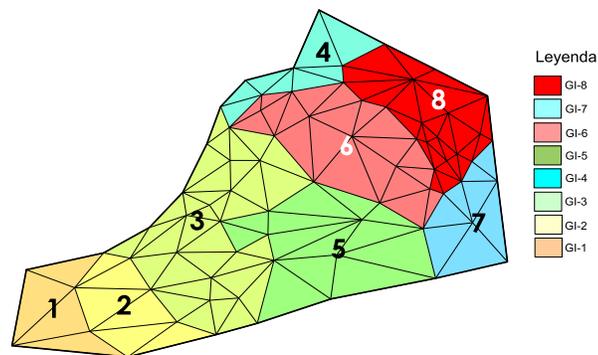
### Zonificación

La herramienta AQTRIGEO permite al modelador agrupar triángulos donde se considere que las propiedades hidrogeológicas y características de infiltración de los mismos sean similares. El área de estudio se particiona en 8 grupos de infiltración (ver figura 10) y 11 grupos de propiedades (ver figura 11).

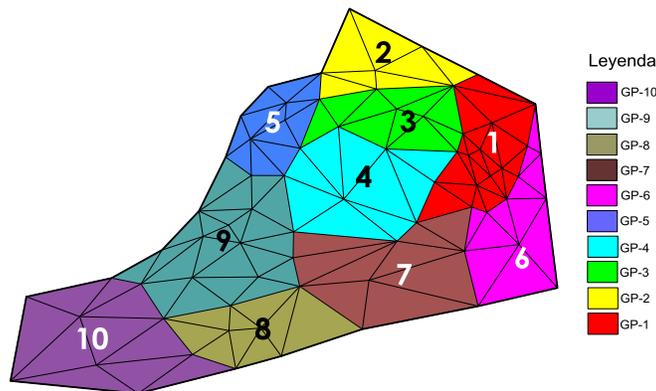
En la tabla 4 se observan los GP del sector Cuentas Claras, destacando la transmisividad ( $T_D$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ). Estas propiedades serán comparadas con las obtenidas en esta investigación.

### Calibración del sector Cuentas Claras

A continuación, se realiza una nueva calibración para el acuífero Cuentas Claras, utilizando los valores de los parámetros del algoritmo SCE obtenidos anteriormente. Se debe señalar que este caso de estudio presenta 20 propiedades por lo que se realizó la calibración considerando los parámetros del algoritmo SCE recomendados para el cuarto escenario (16 propiedades).



**Figura 10. Grupos de infiltración del sector Cuentas Claras (Aguilera 2016)**



**Figura 11. Grupos de propiedades del sector de Cuentas Claras (Aguilera 2016)**

En la tabla 4 se muestran los resultados de las propiedades calibradas para cada grupo obtenidas por Ramos 2012.

En la tabla 5 se observan los resultados de esta calibración. Se obtuvo, además, un valor de la función objetivo de 42,52 con 2358 evaluaciones y un tiempo de cómputo de 5 horas con 53 minutos.

**Tabla 4. Grupo de propiedades**

GP	$T_D$ (m <sup>2</sup> /día)	$S$
1	284	0,0161
2	215	0,0998
3	78	0,0997
4	60	0,0084
5	156	0,084
6	10	0,0014
7	37	0,051
8	3552	0,0419
9	4437	0,0199
10	4704	0,0846

**Tabla 5. Resultados de la calibración**

GP	$T_D$ (m <sup>2</sup> /día)	$S$
1	291	0,017
2	210	0,0999
3	79	0,0987
4	60	0,0084
5	157	0,0825
6	10	0,0014
7	35	0,054
8	3706	0,0431
9	4411	0,021
10	4908	0,0799

**Análisis comparativo de propiedades calibradas**

En las tablas 6 y 7 se presentan las transmisividades y coeficientes de almacenamiento por Ramos (2012) y por Aguilera (2016) respectivamente.

**Tabla 6. Transmisividades (m<sup>2</sup>/día)**

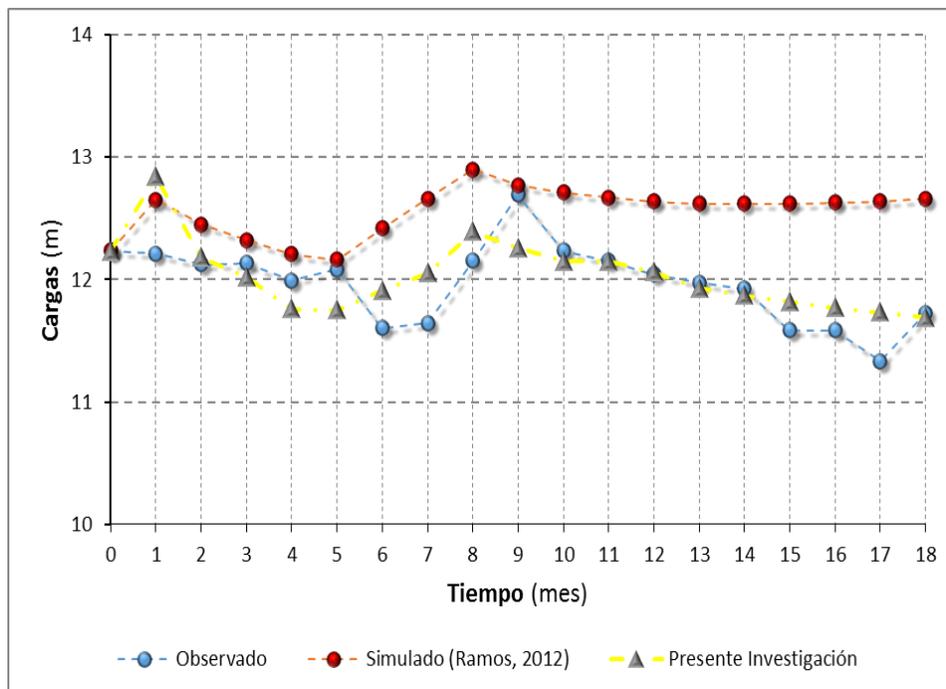
GP	Aguilera (2016)	Ramos (2012)
1	291	284
2	210	215
3	79	78
4	60	60
5	157	156
6	10	10
7	35	37
8	3706	3552
9	4411	4437
10	4908	4704

**Tabla 7. Coeficientes de almacenamiento**

GP	Aguilera (2016)	Ramos (2012)
1	0,017	0,0161
2	0,0999	0,0998
3	0,0987	0,0997
4	0,0084	0,0084
5	0,0825	0,084
6	0,0014	0,0014
7	0,054	0,051
8	0,0431	0,0419
9	0,021	0,0199
10	0,0799	0,0846

Como la comparación de las propiedades no brinda información suficiente sobre el comportamiento que puede tener el acuífero en cuanto a niveles, se hizo una comparación entre las cargas simuladas por Ramos (2012) y las simuladas por la presente investigación Aguilera (2016) a partir de las cargas observadas.

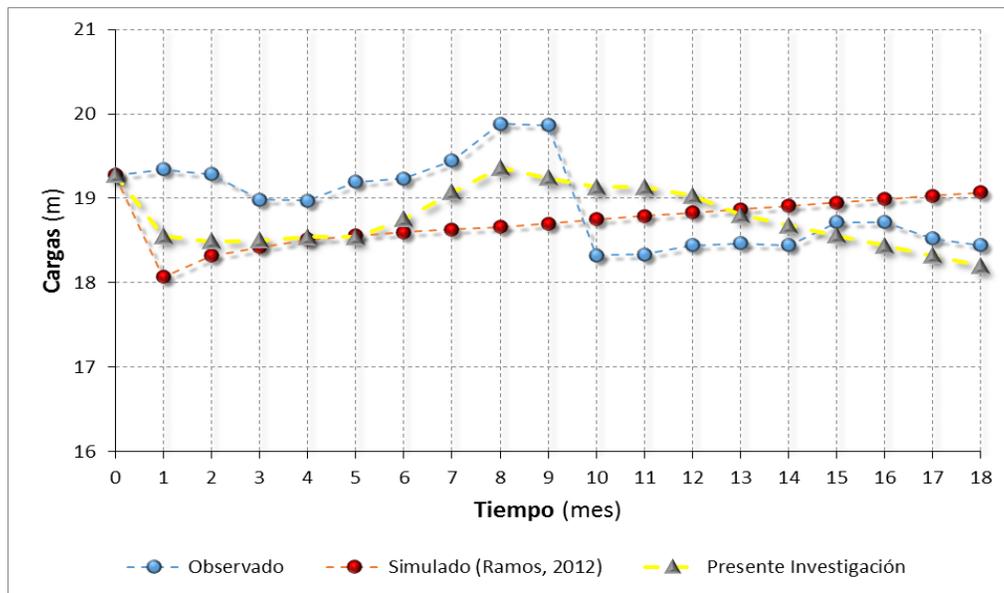
En las figuras 12, 13 y 14 y las tablas 8, 9 y 10 se muestran estas comparaciones, aclarar que solo se tuvo en cuenta estas figuras y tablas porque son las más representativas en cuanto al error. Se tomó como criterio de error la media de los valores absolutos de las diferencias entre los niveles observados y simulados.



**Figura 12. Comparación gráfica entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-2, nodo 43 en un período de 18 meses**

**Tabla 8. Comparación entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-2, nodo 43 según Aguilera (2016) y Ramos (2012)**

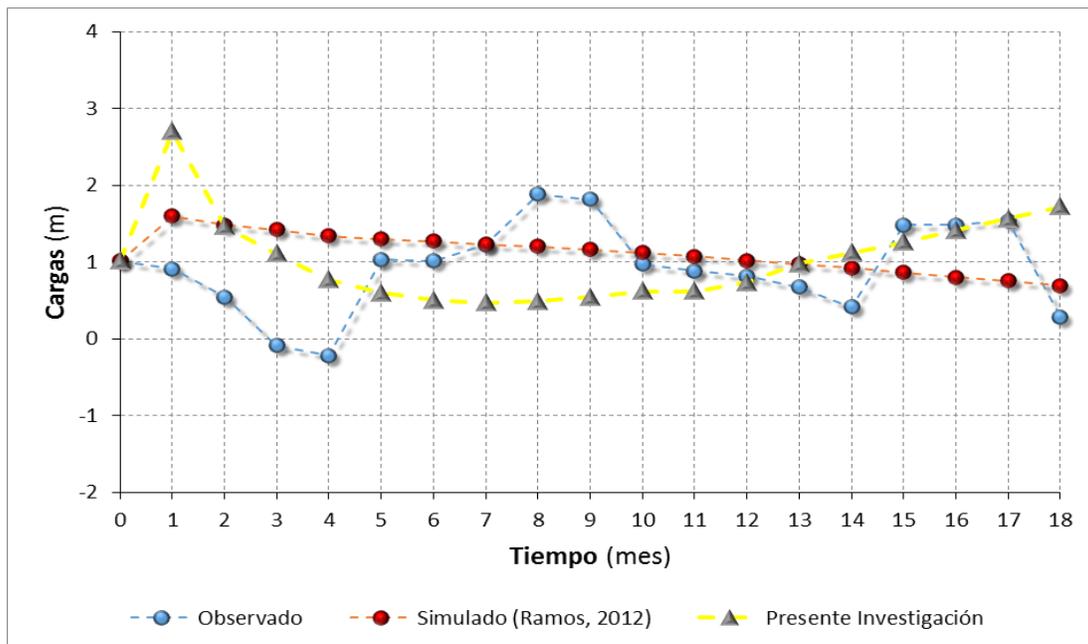
Tiempo (meses)	Carga observada (metros)	Carga simulada (metros)		Error absoluto de la carga (metros)	
		Ramos (2012)	Aguilera (2016)	Ramos (2012)	Aguilera (2016)
0	12,23	12,23	12,23	0	0
1	12,21	12,65	12,84	0,44	0,63
2	12,12	12,45	12,18	0,33	0,06
3	12,13	12,32	12,02	0,19	0,11
4	11,99	12,21	11,76	0,22	0,23
5	12,08	12,16	11,75	0,08	0,33
6	11,6	12,42	11,91	0,82	0,31
7	11,64	12,66	12,05	1,02	0,41
8	12,15	12,9	12,39	0,75	0,24
9	12,69	12,77	12,26	0,08	0,43
10	12,23	12,71	12,15	0,48	0,08
11	12,15	12,67	12,15	0,52	0
12	12,04	12,64	12,06	0,6	0,02
13	11,97	12,62	11,93	0,65	0,04
14	11,92	12,62	11,87	0,7	0,05
15	11,58	12,62	11,82	1,04	0,24
16	11,58	12,63	11,77	1,05	0,19
17	11,33	12,64	11,73	1,31	0,4
18	11,72	12,66	11,69	0,94	0,03
		<b>Promedio</b>	(metros)	<b>0,62</b>	<b>0,21</b>



**Figura 13. Comparación gráfica entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-83, nodo 125 en un período de 18 meses**

**Tabla 9. Comparación entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-83, nodo 125 según Aguilera (2016) y Ramos (2012)**

Tiempo (meses)	Carga observada (metros)	Carga simulada (metros)		Error absoluto de la carga (metros)	
		Ramos (2012)	Aguilera (2016)	Ramos (2012)	Aguilera (2016)
0	19,28	19,28	19,28	0	0
1	19,35	18,07	18,55	1,28	0,8
2	19,29	18,32	18,49	0,97	0,8
3	18,99	18,42	18,5	0,57	0,49
4	18,98	18,51	18,54	0,47	0,44
5	19,2	18,56	18,54	0,64	0,66
6	19,24	18,6	18,75	0,64	0,49
7	19,45	18,63	19,07	0,82	0,38
8	19,89	18,66	19,36	1,23	0,53
9	19,87	18,7	19,24	1,17	0,63
10	18,33	18,75	19,13	0,42	0,8
11	18,34	18,79	19,13	0,45	0,79
12	18,45	18,83	19,03	0,38	0,58
13	18,47	18,87	18,8	0,4	0,33
14	18,45	18,91	18,68	0,46	0,23
15	18,72	18,95	18,56	0,23	0,16
16	18,72	18,99	18,44	0,27	0,28
17	18,53	19,03	18,32	0,5	0,21
18	18,45	19,07	18,2	0,62	0,25
		<b>Promedio</b>	(metros)	<b>0,64</b>	<b>0,49</b>



**Figura 14. Comparación gráfica entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-L2, nodo 203 en un período de 18 meses**

**Tabla 10. Comparación entre los niveles observados y simulados en el pozo de observación Po-L2, nodo 203 según Aguilera (2016) y Ramos (2012)**

Tiempo (meses)	Carga observada (m)	Carga simulada (m)		Error absoluto de la carga (m)	
		Ramos (2012)	Aguilera (2016)	Ramos (2012)	Aguilera (2016)
0	1,01	1,01	1,01	0	0
1	0,91	1,6	2,7	0,69	1,79
2	0,54	1,48	1,46	0,94	0,92
3	-0,09	1,42	1,11	1,51	1,2
4	-0,22	1,34	0,77	1,56	0,99
5	1,03	1,3	0,6	0,27	0,43
6	1,01	1,27	0,5	0,26	0,51
7	1,22	1,23	0,47	0,01	0,75
8	1,88	1,2	0,49	0,68	1,39
9	1,81	1,16	0,54	0,65	1,27
10	0,97	1,12	0,62	0,15	0,35
11	0,88	1,07	0,62	0,19	0,26
12	0,81	1,02	0,73	0,21	0,08
13	0,67	0,97	0,98	0,3	0,31
14	0,41	0,92	1,12	0,51	0,71
15	1,48	0,86	1,26	0,62	0,22
16	1,48	0,8	1,41	0,68	0,07
17	1,53	0,75	1,56	0,78	0,03
18	0,28	0,69	1,72	0,41	1,44
		<b>Promedio</b>	(metros)	<b>0,58</b>	<b>0,71</b>

**Resultados de la calibración empleando el Shuffled Complex Evolution (SCE)**

En la tabla 11 se ven los resultados obtenidos por ambas investigaciones con el SCE.

**Tabla 11. Resultados obtenidos**

Nombre	Ramos (2012)	Aguilera (2016)
Error medio (metros)	0,5	0,44
FO	48,58	42,52
Tiempo (horas)	17	6

**CONCLUSIONES**

- Se obtuvieron los parámetros algorítmicos óptimos que permiten mejorar el rendimiento del algoritmo Shuffled Complex Evolution al emplearse en la calibración de acuíferos. Esta tarea se llevó a cabo utilizando un acuífero hipotético y una metodología recomendada en la literatura.
- Empleando los parámetros algorítmicos óptimos obtenidos en esta investigación se mejoró la calibración del acuífero real Cuentas Claras obteniendo un menor valor de la función objetivo, un menor error y un tiempo de cómputo mucho menor al reportado en una previa investigación. Los resultados en Aguilera (2016) reflejan un mejor comportamiento hidrodinámico que los de Ramos (2012). Es necesario mencionar que se emplearon diferentes computadoras debido a las características de cada una, solo mencionando la empleada en Aguilera (2016), tenía un mejor procesador: Intel (R) Core (TM) i5.

- La modelación matemática es la principal técnica capaz de comprender y estudiar la compleja dinámica de las aguas subterráneas en Cuba, mediante la creación del paquete de programas AQÜIMPE. Esta tecnología se encuentra equipada con un módulo capaz de realizar la calibración de los parámetros hidrogeológicos de manera automática, empleando al algoritmo Shuffled Complex Evolution el cual ha sido aplicado con éxito al problema inverso del agua subterránea.

## REFERENCIAS

- Aguilera R.** (2016). “Obtención de los parámetros óptimos del algoritmo Shuffled Complex Evolution para la calibración de modelos de acuíferos”. Tesis en opción al grado de Ingeniero Hidráulico, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Cabrera E.** (2009). “Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea”. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Ciudad de la Habana, Cuba.
- Duan Q., Sorooshian A. and Gupta K.** (1992). “Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization”, *Journal of Optimization Theory and Applications*. vol. 28, no. 4, pp. 1015-1031. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, USA.
- Duan Q., Sorooshian A. and Gupta K.** (1993). “Shuffled Complex Evolution approach for effective and efficient global minimization”, *Journal of Optimization Theory and Applications*. vol. 76, no. 3, pp. 501-521. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, USA.
- Duan Q., Sorooshian A. and Gupta K.** (1994). “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models.”. *J. Hydrol.* Department of Hydrology and Water Resources, Vol. 158, Pages 265-284. University of Arizona, Tucson, USA.
- Gómez M.** (2008). “Plataforma modular integrada para la gestión del agua subterránea como recurso”. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Ciudad de la Habana.
- Hernández A., Martínez J., Dilla F. y Llanusa H.** (2001). “Modelación de acuíferos”. Monografía. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Martínez J., Llanusa H., Hernández A. y Dilla F.** (2000). “Manual del usuario del sistema AQÜIMPE”. Monografía. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Ramos L.** (2012). “Modelación matemática del acuífero Cuentas Claras”. Tesis en opción al grado de Ingeniero Hidráulico, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Ramos L., Karunanandarajah M., Cabrera E., Hernández A. y Marón D.** (2014). “Modelación del acuífero Cuentas Claras”. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.