

NOTA TÉCNICA

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20671.71840>

# Minimización del costo de bombeo de la explotación del acuífero Cuenca Sur

## *Minimization of the pumping cost of the Cuenca Sur aquifer exploitation*

Ing. Lemuel Carlos Ramos-Arzola<sup>I</sup>, Dr. C. Eric Cabrera-Estupiñán<sup>II</sup>, Dr. C. Armando Orestes Hernández-Valdés<sup>I</sup>,  
Dr. C. David Ernesto Marón-Domínguez<sup>III</sup>

<sup>I</sup>Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”-CUJAE, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Marianao, La Habana, Cuba.

<sup>II</sup>Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, Ecuador.

<sup>III</sup> Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”-CUJAE, Centro de Estudios Matemáticos (CEMAT), Marianao, La Habana, Cuba.

**RESUMEN.** Aproximadamente el 70% del consumo mundial de agua dulce está destinado a la agricultura. En particular, a esta actividad se destina la mayor cantidad de agua subterránea que se extrae anualmente. El componente de mayor costo de la producción de agua subterránea (una vez que los pozos están construidos) es la energía requerida para elevar el agua. La presente contribución se basa en aplicar el modelo de administración de acuíferos MADA al acuífero Cuenca Sur, con el objetivo de obtener el consumo óptimo de los 19 pozos del acueducto, garantizando un costo mínimo de operación. MADA utiliza el enfoque matriz respuesta para vincular el modelo de simulación (AQÜIMPE) con un algoritmo de programación cuadrática. El problema de optimización es resuelto utilizando la función quadprog de MATLAB. La administración se realiza en régimen impermanente durante un año, donde se considera una recarga proveniente de la lluvia del 75% de probabilidad, y se deben garantizar un conjunto de restricciones, de demanda, de capacidad instalada y de niveles dinámicos en los pozos de bombeo. El esquema óptimo de operación del sistema obtenido tiene un gran valor práctico para las autoridades responsables del manejo de esta importante fuente.

**Palabras clave:** modelación del agua subterránea, modelo de administración MADA, enfoque matriz respuesta, AQÜIMPE, MATLAB.

**ABSTRACT.** Approximately 70% of global freshwater consumption is used for agriculture. In particular, the largest amount of extracted groundwater is intended to this activity. The major cost component in the water production of groundwater supply system (once the wells are built) is pumping water from wells. In this contribution, groundwater management model MADA is applied in Cuenca Sur aquifer, to obtain the optimal operation cost from 19 pumping well of the aqueduct. MADA use the response matrix approach to link the simulation model (AQÜIMPE) with a quadratic programming problem, which is solved using the function quadprog of the mathematical assistant MATLAB. The exploitation management is performed in transient during a year, where it is considering a recharge from a precipitation of 75% of probability, a set of constraints of water demand, installed capacity and dynamic levels in each operating well must be guaranteed. The optimal system operation scheme obtained has great practical value for the authorities responsible for managing this important source.

**Keywords:** groundwater modeling, groundwater management model MADA, response matrix approach, AQÜIMPE, MATLAB.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y el aumento de la producción y el consumo han generado una demanda de agua dulce cada vez mayor. El riego

es el mayor usuario de agua con aproximadamente el 70% del consumo mundial de agua dulce (Siebert *et al.*, 2010). De este consumo de agua dulce el 4 % proviene de fuentes subterráneas

(WWAP, 2015). Se estima que el 20% de los acuíferos están siendo sobreexplotados (WWAP, 2015), por lo que se hace necesario el empleo de modelos de simulación-optimización (MSO) para obtener políticas que permitan una explotación racional de los recursos hídricos subterráneos.

Dentro de la administración de acuíferos un problema bastante frecuente es el de obtener la política de explotación que garantiza el mínimo costo de bombeo de un campo de pozos de un sistema acuífero. La energía requerida en la producción de agua subterránea es a menudo el mayor componente energético, y por tanto el mayor costo, en un sistema de suministro de agua (una vez que los pozos están construidos), teniendo un mayor peso cuando se presentan bajos niveles del agua subterránea producto de un bombeo sostenido (Ahlfeld & Laverty, 2015). Para minimizar el costo de operación o de bombeo es necesario optimizar una función que involucra el producto del caudal y la carga hidráulica, siendo esta última una función del caudal, por lo que es imposible abordar este problema a través de técnicas de programación lineal y se requiere el uso de métodos de programación no lineal.

Los MSO o modelos de administración permiten encontrar alternativas para un mejor uso sostenible del agua subterránea (Gorelick & Zheng, 2015), resolviendo un problema de optimización que se formula adecuadamente con objetivos definidos y restricciones físicas y administrativas (Datta & Kourakos, 2015). El enfoque matriz respuesta (EMR) y el enfoque embebido (EE) son los dos métodos generalmente usados para incorporar el modelo de simulación dentro del modelo de optimización (Gorelick, 1983). En Cuba se dispone de un MSO llamado MADA (Cabrera y Dilla, 2011) que puede utilizar el EE o el EMR para acoplar el modelo de simulación (AQÛIMPE) dentro de un problema de optimización. MADA es capaz de resolver una variedad de problemas de administración lineales utilizando el EE, y resuelve el problema de minimizar el costo de bombeo empleando el EMR. Para resolver este último problema se emplea la función *quadprog* de MATLAB.

En la presente contribución se aplica MADA al acuífero de la Cuenca Sur de La Habana obteniéndose el patrón óptimo de explotación que garantiza el mínimo costo de bombeo. Además el patrón de explotación obtenido satisface un conjunto de restricciones de demanda, de capacidad instalada en cada pozo de explotación, y de niveles en estos pozos. En esta última restricción se utiliza una estrategia que tiene en cuenta los niveles dinámicos que se producen durante el bombeo. Por último, el costo de bombeo del patrón de explotación encontrado permite un ahorro del 12% en relación con el costo de la explotación real del año 2007 a la que fue sometida este acuífero.

## MÉTODOS

Modelo de simulación: AQÛIMPE simula el flujo no permanente bidimensional del agua subterránea, tanto en acuíferos libres como confinados a escala regional. Permite simular la interacción del acuífero con un cuerpo de agua superficial

(lago o embalse) siempre que exista comunicación entre ambos. Resuelve la ecuación diferencial del flujo del agua subterránea mediante el método de los elementos finitos con triángulo cuadrático y aplicando la aproximación de Galerkin. Además posee un módulo para la calibración automática de las propiedades hidrogeológicas del acuífero<sup>1</sup>, Cabrera y Dilla, 2011).

**Modelo de administración de acuíferos MADA:** Este modelo utiliza el EE o el EMR para acoplar AQÛIMPE dentro de un algoritmo de optimización, lineal o no lineal, resuelto mediante la función *linprog* o *quadprog* de MATLAB. Además incluye un procedimiento que permite determinar los abatimientos reales que ocurren en los pozos de explotación<sup>2</sup>; Cabrera y Dilla, 2011). MADA concibe cuatro funciones objetivos: 1- Maximizar la suma de las cargas, 2- Minimizar la suma de los abatimientos (diferencia entre niveles del estado inicial y tiempo final), 3- Maximizar los caudales, 4- Minimizar el costo de bombeo o costo de operación; en los cuatro casos se aplica a los nodos con gasto puntual a optimizar para todos los tiempos. Además cuenta con tres tipos de restricciones: restricción de niveles, restricción de demanda, y restricción de caudal. Para tener en cuenta los abatimientos reales que ocurren en los pozos de bombeo, MADA incorpora una expresión que puede considerar varios efectos locales, ejemplo, régimen no lineal de flujo que muchas veces ocurre en la vecindad de un pozo de bombeo, la posible penetración parcial, las pérdidas por estructura del pozo<sup>2</sup>, etc. El EMR usa el modelo de simulación (AQÛIMPE) de forma externa para obtener la respuesta de la carga hidráulica producto del bombeo, y el EE incorpora de forma explícita las ecuaciones de AQÛIMPE dentro del modelo de optimización. En la presente contribución solo se emplea el EMR.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo MADA se aplicó en el acuífero Cuenca Sur ubicado en el sur de la provincia Mayabeque (Figura 1), una de las principales fuentes de suministro de agua potable a la Ciudad de la Habana. La extracción a la que fue sometido el acuífero Cuenca Sur durante el año 2007 corresponde con el Plan del Uso del Agua (ajustado), y fue de alrededor de 252,32 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. Primeramente se simuló el acuífero durante ese año considerando la recarga proveniente de la lluvia del 75% de probabilidad. Esta simulación permitió obtener las cargas que ocurren en los pozos de explotación del acueducto de Cuenca Sur. Posteriormente se determinó el costo de bombeo en esos nodos, arrojando un valor de \$ 2.11·10<sup>6</sup> ese año.

Utilizando las mismas condiciones de la simulación anterior se procede a la aplicación del modelo MADA con la función objetivo que minimiza el costo de bombeo. Se considera 1 año como horizonte de planeamiento, con 12 períodos de administración (incremento mensual). Serán variables de decisión en el problema los caudales de los 19 pozos del acueducto de Cuenca Sur en los 12 meses del

<sup>1</sup> MARTÍNEZ, J. B.: Simulación matemática de cuencas subterráneas: flujo impermanente bidimensional, Monografía, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", 1989.

<sup>2</sup> CABRERA, E.: Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea, Tesis doctoral, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", 2007.

horizonte de planeamiento. El modelo de administración debe satisfacer restricciones de niveles dinámicos mínimos, restricciones de demanda y el gasto en cada pozo estará limitado superiormente por  $0.532 \text{ hm}^3 \text{ mes}^{-1}$ . Se obtuvo la distribución óptima de caudales que garantiza el mínimo costo de bombeo y además satisface todas las restricciones

anteriores (Tabla 1). Con la solución obtenida el costo de bombeo se disminuyó hasta  $\$ 1.86 \cdot 10^6$  representando un ahorro del 12% ( $\$ 250\,000$ ) en comparación con el costo de la explotación real del año 2007.

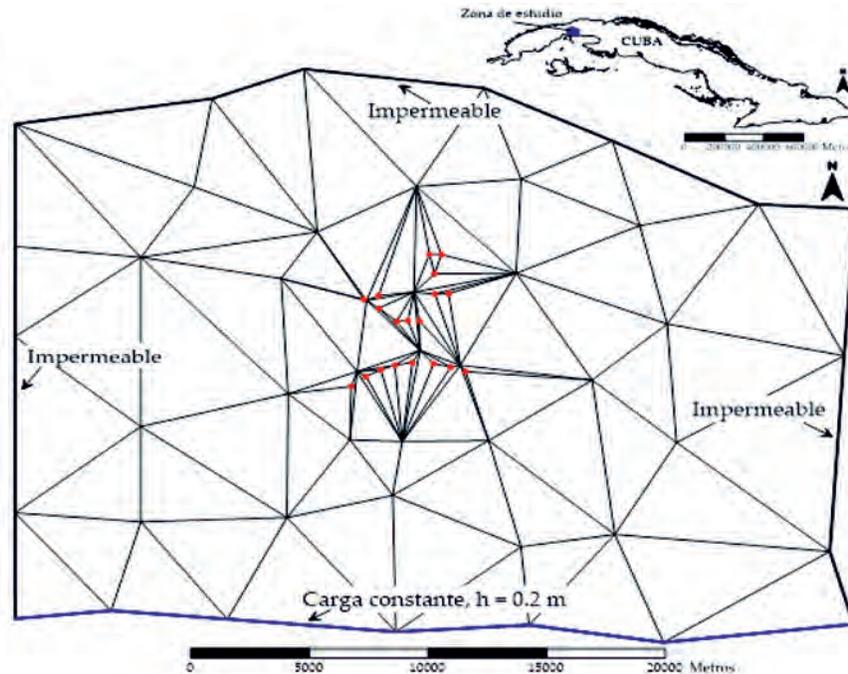


FIGURA 1. Ubicación de la zona de estudio, discretización del acuífero, condiciones de frontera y ubicación de los pozos de explotación del acueducto (puntos rojos).

TABLA 1. Extracción óptima del campo de pozos de Cuenca Sur ( $\text{hm}^3 \text{ mes}^{-1}$ )

Pozo	Meses											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0,196	0,132	0	0,075	0,074	0,100	0	0,112	0,041	0	0,082	0,049
2	0,349	0,274	0,147	0,220	0,219	0,244	0,147	0,255	0,185	0,153	0,226	0,190
3	0,220	0,148	0,053	0,120	0,127	0,153	0,069	0,170	0,109	0,084	0,153	0,129
4	0,520	0,409	0,299	0,392	0,408	0,449	0,337	0,480	0,401	0,369	0,469	0,441
5	0,418	0,321	0,191	0,294	0,305	0,348	0,234	0,378	0,298	0,266	0,365	0,335
6	0,532	0,532	0,431	0,532	0,532	0,532	0,473	0,532	0,532	0,521	0,532	0,532
7	0,532	0,523	0,424	0,515	0,532	0,532	0,457	0,532	0,527	0,492	0,532	0,532
8	0,532	0,532	0,478	0,532	0,532	0,532	0,509	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
9	0,483	0,506	0,414	0,505	0,529	0,532	0,459	0,532	0,532	0,503	0,532	0,532
10	0,445	0,517	0,428	0,518	0,532	0,532	0,472	0,532	0,532	0,517	0,532	0,532
11	0,487	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
12	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
13	0,467	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
14	0,282	0,370	0,407	0,413	0,412	0,455	0,478	0,511	0,532	0,532	0,532	0,512
15	0,243	0,300	0,328	0,332	0,333	0,366	0,384	0,413	0,440	0,460	0,439	0,416
16	0,286	0,334	0,360	0,361	0,364	0,403	0,419	0,460	0,497	0,522	0,492	0,467
17	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
18	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532
19	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532	0,532

## CONCLUSIONES

- Se obtiene la distribución óptima de la explotación del campo de pozos del acueducto Cuenca Sur que garantiza el mínimo costo de bombeo, obteniéndose un ahorro del 12% en relación con el costo de la explotación real del año 2007 a la que fue sometida este acuífero. Además la solución obtenida satisface todas las restricciones administrativas y físicas impuestas, La obtención de este esquema óptimo de operación del sistema puede ser de gran valor práctico para las autoridades responsables del manejo de esta importante fuente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLFELD, D. P. & LAVERTY, M. M.: "Field scale minimization of energy use for groundwater pumping", *Journal of Hydrology*, ISSN-0022-1694, 525: 489-495, 2015.
- CABRERA, E. y DILLA, F.: "Modelo de administración de acuíferos: MADA", *Tecnología y Ciencias del Agua*, ISSN-0187-8336, 2(4): 5-24, 2011.
- DATTA, B. & KOURAKOS, G.: "Preface: Optimization for groundwater characterization and management", *Hydrogeology Journal*, ISSN: 1431-2174 (Print), 1435-0157 (Online), 23(6): 1043-1049, 2015.
- GORELICK, S. M. & ZHENG, C.: "Global change and the groundwater management challenge", *Water Resources Research*, ISSN-0043-1397, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016825>, 51(5): 3031-3051, 2015.
- GORELICK, S. M.: "A review of distributed parameter groundwater management modeling methods", *Water Resources Research*, ISSN-0043-1397, 19(2): 305-319, 1983.
- SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DOLL, P. & PORTMANN, F. T.: "Groundwater use or irrigation: A global inventory", *Hydrology and Earth System Sciences*, ISSN-027-5606, 14: 1863-1880, 2010.
- WWAP (World Water Assessment Programme): *Agua para un mundo sostenible: datos y cifras, Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015*, USA, 2015.

Recibido: 23/12/2015

Aprobado: 15/06/2016.

Lemuel Carlos Ramos-Arzola, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"-CUJAE, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: [lemuel@cih.cujae.edu.cu](mailto:lemuel@cih.cujae.edu.cu)

Eric Cabrera-Estupiñán, Correo electrónico: [ecabrerae@gmail.com](mailto:ecabrerae@gmail.com)

Armando Orestes Hernández-Valdés, Correo electrónico: [ahernandez@cih.cujae.edu.cu](mailto:ahernandez@cih.cujae.edu.cu)

Ernesto Marón-Domínguez, Correo electrónico: [dmaron@cemat.cujae.edu.cu](mailto:dmaron@cemat.cujae.edu.cu)

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

