

CAPTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA POR DRENES HORIZONTALES EN PEQUEÑAS ISLAS. UNA CONTRIBUCIÓN A GRAPHIC.

GROUNDWATER EXPLOITATION IN SMALL ISLANDS BY HORIZONTAL DRAINS. A CONTRIBUTION TO GRAPHIC

Dr. Armando O. Hernández Valdés

Resumen

En el trabajo se realiza una valoración de los diferentes tipos de obra de captación de las aguas subterráneas utilizadas en las zonas costeras y en particular en las pequeñas islas, donde se manifiesta el fenómeno conocido por intrusión salina. Se describe la situación que se presenta en algunos cayos que utilizan las trincheras como obra de captación, señalándose algunos inconvenientes que se presentan en estas cuando pueden ser invadidas por penetraciones del mar asociadas a intensos huracanes.

Se insiste en no utilizar pozos de bombeo aunque sean someros, por los conos de intrusión asociados a los mismos y se recomienda sustituir las trincheras abiertas por drenes horizontales con sistemas de control de niveles y de calidad del agua en los colectores desde donde se bombearía el agua como si fueran depósitos de almacenamiento y regulación., al mismo tiempo se reducen las pérdidas por evaporación directa desde las trincheras, las afectaciones ambientales, la contaminación directa por el arrastre de sólidos y disminuyen las posibilidades de las penetraciones del mar en los sistemas de captación.

Se realiza la validación del software AQÜIMPE para modelar los drenes horizontales en su comparación con expresiones analíticas de trincheras de penetración parcial, una de ellas deducida en el propio trabajo, considerando la validez de las hipótesis de Ghyben-Herzberg al utilizar un modelo de interfaz abrupta.

Se enfatiza en que no es suficiente para lograr la sostenibilidad de las aguas subterráneas en las pequeñas islas las modificaciones a los sistemas de captación, sino que es necesario incluir tecnologías que mejoren la adquisición de datos, conocimiento del sistema acuífero y la modelación matemática en el diseño, operación y optimización de la explotación de estos recursos.

Este trabajo se propone como una contribución al proyecto GRAPHIC de la UNESCO, atendiendo a la vulnerabilidad que presentan las pequeñas islas a los efectos del cambio climático en cuanto a los incrementos en las frecuencias de los eventos extremos en las manifestaciones de grandes periodos de sequías que reducen las recargas de las aguas subterráneas y por lo tanto los espesores de los lentes de agua dulce disponibles para la explotación, los intensos huracanes afectando los sistemas de captación y por otro lado los pronósticos a largo plazo de las sobre-elevaciones del nivel del mar y los incrementos en las demandas debido al desarrollo poblacional.

Palabras Clave: Drenes horizontales, intrusión salina, pequeñas islas, cambio climático, modelación.

Abstract

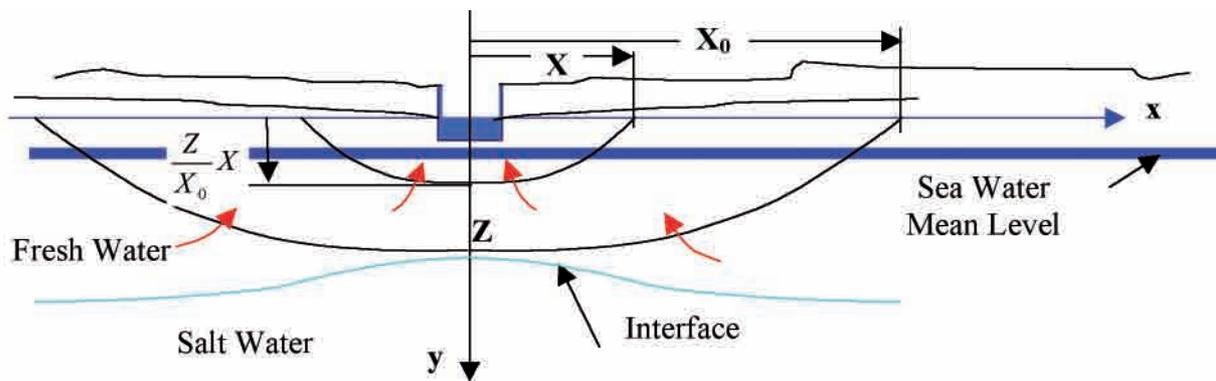
In this work, an analysis is carried out for different types of groundwater exploitation systems used in coastal areas and in particular in small islands, where the well-known phenomenon is manifested by seawater intrusion. In many cases as Cayo Largo del Sur in Cuba and Andros key in Bahamas, which use open trenches for groundwater supply, some inconveniences are encountered when these trenches can be invaded by penetrations of the sea water associated with intense hurricanes due to storm surges.

It is insisted not to use pumping wells although they are shallow, because of intrusion cones associated with the same ones. It is also recommended to substitute the trenches opened up by horizontal drains- as those proposed by Hernández A. O. (2008),- with systems of levels control and water quality in the collectors from where the water would be pumped as if they were storage deposits and regulation. At the same time, it will decrease the losses for direct evaporation from the trenches, the environmental impact, the direct contamination for the haulage of solids and it will also diminish the possibilities of the penetrations of the sea water in the reservoirs' systems.

The objective of this work is to carry out the validation of the software AQÜIMPE to model the horizontal drains in comparison with analytic expressions of partial penetration trenches. One of these analytical expressions deduced in the own work, considering the validity of the hypotheses from Ghyben-Herzberg when using a model of sharp interface.

With the objective to validate the possible utilization of the AQÜIMPE program, Hernández Valdés A. O. et al. (2001), and their version in Windows system (WinAQE), to simulate the Andros's case within the UNESCO GRAPHIC project, a numerical model of a trench or its equivalent as horizontal drain is performed, and it was then compared with an analytic solution developed by the own author, considering the effect of the change of the interface according to the following

¹ Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE. Calle 114, No. 11901 e/ 119 y 127 Marianao. Ciudad de la Habana. Cuba.
e-mail: ahernandez@cih.cujae.edu.cu



hypotheses and calculation outline.

Considering that the traverse surfaces to the flow follow the form of a parabolic cylinder with vertex in the vertical axis. The longitude of the traverse parabolic arch to the flow for each distance X would be:

$$S = \left[\frac{2\beta}{\alpha} + \frac{\alpha}{4} \log\left(\frac{\beta+1}{\beta-1}\right) \right] X \quad \text{where; } \alpha = \frac{X_0}{Z} \text{ y } \beta = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{4}}$$

For the modeling case $X_0 = 200\text{m}$, $Z=20\text{m}$, for that; $\alpha=10$ and $\beta=5.099$, therefore $S = 1.45125 \cdot X$

Applying the law of Darcy, the equation of continuity and integrating results in the following equation:

$$h_2 - h_1 = \frac{q}{1.45125 \cdot K_D} \ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right)$$

In the numerical simulation case: $K_D=50 \text{ m/d}$ and a flow $q = 4 \text{ m}^3/\text{d/m}$,

For a trench of $0,5 \text{ m}$ of width and of same depth of water, the wet perimeter would be, $1,5 \text{ m}$. For which corresponding X_1 , that generates same traverse surface to the flow would be of $1,0336\text{m}$.

For $X_2=200\text{m}$, $X_1=1,0336$, $h_1=0$, the h_2 value would be of $0,29\text{m}$, similar to the one obtained by the simulation of $0,3 \text{ m}$.

If the trench is evaluated with the formula Numerov for partially penetrating trenches, Aravin, V.I. and Numerov, S.N. 1965, the value that would be obtained for the descent level in the trench would be $S_0 = 0,287 \text{ m}$, equivalent value to the obtained by the author formula.

It is emphasized that it is not enough to achieve the sustainability of the groundwater in the small islands via the modifications to the exploitation systems, but rather it is necessary to include technologies that improve the acquisition of data, knowledge of the aquifer system and the mathematical modeling in the design, operation and optimization of the exploitation of these resources.

This work is proposed as a contribution to the UNESCO GRAPHIC project, considering the effects of the climate change on the vulnerability of the small islands. The Climate Change will increase the frequency of occurrence of the extreme events as long period of droughts which reduce the recharge of the groundwater and hence lower of the available fresh water table. On the other hand, the intense hurricanes affect the water intake systems and also the long term forecasts of the high sea level and the demand increments which are due to the population development.

Key words Horizontal Drains, seawater intrusion, small islands, climatic change, modeling.

INTRODUCCIÓN

En las llanuras carstificadas colindantes con el mar se encuentran los principales recursos de aguas subterráneas de Cuba. Casi todas estas cuencas están comunicadas con el mar tanto superficial como subterráneamente. Las aguas dulces de estas cuencas se vierten en los pantanos costeros y en manantiales situados en la plataforma insular. Pero el hecho mismo de estar comunicadas directamente con el mar implica también que las aguas dulces están en contacto con las aguas marinas.

Obviamente, la explotación de las aguas dulces subterráneas tiende a incrementar el avance de la cuña salina y puede provocar la salinización de las

aguas subterráneas del acuífero, debido al efecto de mezcla que se produce entre las aguas de mayor salinidad provenientes del mar y las aguas de menor concentración de sales del acuífero. La salinización se convierte entonces en un problema de calidad del agua y por ello, en una restricción de la capacidad de los acuíferos de satisfacer la demanda de agua potable. Sobre todo, si se tiene en cuenta que la descontaminación de los acuíferos salinizados puede tardar decenas de años.

El agua dulce de menor densidad y la salada de mayor densidad en un acuífero costero están separadas por una zona conocida como interfaz, siendo una zona de transición entre ambos tipos de agua donde ocurre una mezcla entre ambas, por lo

que también se le denomina zona de dispersión. Esta zona de transición se caracteriza fundamentalmente por las concentraciones de las sales totales disueltas que varían en un rango de 1000 mg/l a 35000 mg/l o por las concentraciones de los cloruros como ión predominante del agua salada ya anteriormente expuesto y que varían de 250 mg/l a 19000 mg/l. Dentro de la zona de transición, el agua dulce que fluye hacia el mar se mezcla con el agua salada por procesos de dispersión y difusión molecular, fenómenos que dependen de las condiciones hidrodinámicas del flujo subterráneo en gran medida definidas por diferentes acciones sobre el sistema, por las propiedades geométricas e hidrogeológicas del acuífero, su heterogeneidad y anisotropía, así como de las estructuras geológicas confinantes, Barlow P.M. (2003). Las acciones son fuerzas dinámicas que

operan en escalas de tiempo de diferente magnitud, como son las fluctuaciones diarias producto de las mareas, estacionales con los mecanismos de la recarga en dependencia del comportamiento de las lluvias anuales o hiperanuales, ascensos y descensos catastróficos debidos a la presencia de eventos extremos como huracanes y por acciones antrópicas causadas por los mecanismos de explotación o recarga artificial del acuífero.

La intrusión salina, no es más que un equilibrio que se genera de forma natural entre el agua dulce y el agua salada en los acuíferos costeros abiertos y que está en función del caudal vertido hacia el mar. Al disminuir este flujo por la explotación, se producirá un desplazamiento de la interfaz agua dulce – agua salada que tratará de alcanzar un nuevo estado de

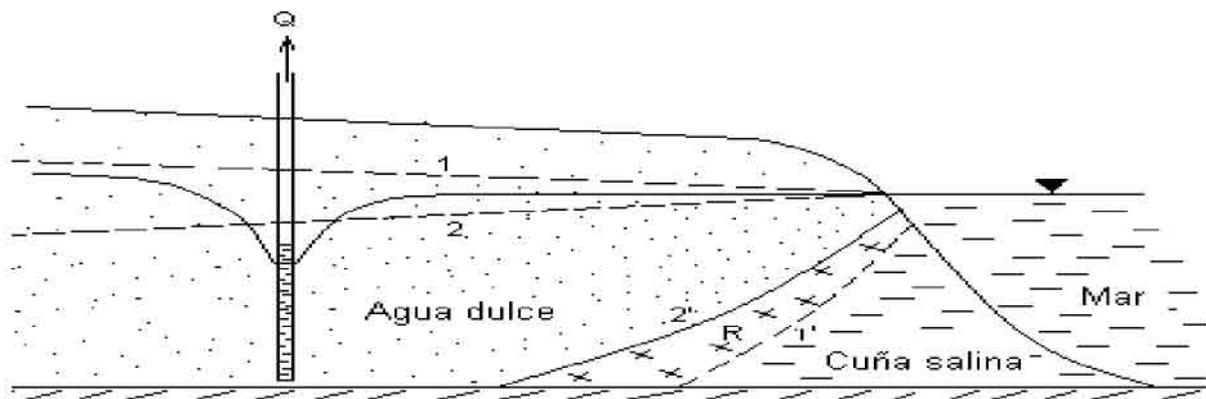


Figura 1. Estados de equilibrio y zona de transición en acuíferos costeros

equilibrio, incrementándose de igual modo la intrusión del agua de mar, ver Figura 1.

Es importante destacar, que las grandes diferencias entre los niveles estáticos y dinámicos, producidos por los pozos de bombeo (necesariamente de penetraciones parciales por lo que se originan mayores descensos), causa un anormal y rápido crecimiento de la superficie de contacto entre las aguas dulces y las saladas, provocando que altas concentraciones de cloruros permanezcan durante mucho tiempo en las aguas anteriormente dulces (conos de intrusión), antes de regresar a las condiciones naturales originales. La ruptura periódica producto del bombeo, de las características del balance de la salinidad de las aguas subterráneas, sin un adecuado control, lleva a un deterioro acelerado de su calidad hasta convertirse en un problema irreparable a corto plazo. La variante de utilizar la combinación de pozos que de forma simultánea estén bombeando por debajo de la interfaz y en el lente de agua dulce (scavenger wells), como se propone por Zack A. and Ronneberg E., 2003, no se considera que sea tan económico como utilizar drenes horizontales y tiene el inconveniente de que una inadecuada operación del sistema pueda causar graves consecuencias atendiendo a que el medio no es homogéneo y que las tecnologías para el control de caudales, niveles y calidad del agua no son siempre disponibles para los pequeños países

insulares en desarrollo, (Small Islands Development System, SIDS).

Aunque los pozos constituyen la principal obra de captación vertical de las aguas subterráneas, en las llanuras costeras y en los cayos donde las cotas del terreno están relativamente cercanas al nivel del mar, no resultan ser las más aconsejables para la extracción de agua dulce, por lo que es recomendable utilizar las obras de captación horizontal (las mayormente empleadas son las trincheras), de notable interés no sólo para el país sino también para el Caribe. Estas también se ven amenazadas por las consecuencias de fenómeno de la intrusión salina e intensificadas además por los ciclones y tormentas tropicales, (López Infante, E.D., 2002 y 2004; Bowleg, J.A. 2004).

Es importante seguir algunas recomendaciones en la selección de las obras de captación, ya que por ejemplo, en las zonas costeras y cayos, donde el nivel freático se encuentra a poca profundidad, las obras de captación horizontal, como trincheras y drenes horizontales, garantizan no sobrepasar durante el bombeo niveles ya prefijados por el fondo de la propia trinchera. No obstante, hay que considerar los problemas ambientales y posibles afectaciones que dicha obra puede tener ante eventos extremos ocasionados por tormentas tropicales, como los

casos ya referidos de Andros, Bowleg II J.A.,(2004) y Cayo Largo del Sur, López Infante, E.D.(2004).

Con el objetivo de evaluar las mejores obras de captación en situaciones como las anteriormente descritas Tarbox D. L. and Hutchings W. C. (2008) realizaron experimentos numéricos que demuestran que en lugar de utilizar pozos de mayor profundidad y caudal de bombeo, sugieren utilizar múltiples pozos someros con pequeños caudales de bombeo, como los realizados en Cayo Coco, Rodríguez V. 1989, las trincheras como las ya antes mencionadas o drenes próximos al nivel freático y de gran longitud que regulen los abatimientos y permita la rápida recuperación del sistema al cesar el bombeo, como la propuesta realizada por el autor en la reunión de Nassau, Hernández A. O., (2008).

Las trincheras de penetración superficial se utilizan en acuíferos libres, cuyo nivel freático está muy cercano a la superficie del terreno natural y donde el espesor de agua dulce por encima del nivel del mar en condiciones naturales es relativamente pequeño, por lo que para el régimen de explotación de las mismas se pueden seguir dos criterios: uno que considere la influencia del gradiente natural de acuerdo a Pérez D., (1986) y otro que suponga que la zona de captación está suficientemente alejada de la costa que permita considerar que tanto la superficie freática como la interfaz son líneas horizontales de acuerdo a Tarbox D. L. and Hutchings W. C. (2008), en ambos casos se supone que existe un equilibrio hidrostático entre el agua dulce de menor densidad y el agua salada subyacente de acuerdo a la ley de Ghyben-Herzberg, lo que se considera como un modelo de interfaz abrupta.

El objetivo del presente trabajo es demostrar que el software AQUIMPE puede ser utilizado en el manejo de la explotación de acuíferos costeros mediante trincheras y que estas deben ser sustituidas por drenes horizontales en las pequeñas islas amenazadas por intensos huracanes.

OBSERVACIONES SOBRE LAS TRINCHERAS REALIZADAS EN ALGUNOS CAYOS.

Caso North Andros Wellfield , Bahamas

En la Figura 3 e indicado con el número (1) aparece la ubicación geográfica de North Andros, perteneciente a las Bahamas. De acuerdo al reporte de Bowleg II J.A., (2004), las características del sistema de trincheras de captación se muestra en la Figura 2, resumiéndose de la forma siguiente:

- Consta de aproximadamente 33000 metros de trincheras abiertas y un total de 27 colectores de concreto prefabricados que conectan las trincheras mediante conductos circulares.
- Cada trinchera tiene 305m de longitud y 90cm de ancho y un máximo de 3 metros de profundidad, la profundidad del agua en la

trinchera oscila de 1,5m a 2,4m (desde el nivel del agua en la trinchera hasta su fondo).

- Cada colector tiene 1,2 metros de diámetro y entre 2,4m y 4,2 de profundidad.

Problemas con las trincheras de Andros.

- Considerando una lámina de evaporación desde superficies libres de 5mm/d, desde las trincheras se evaporan diariamente aproximadamente 2 lps (0.9*33000*0.005)
- Durante los huracanes las olas de tormenta pueden llegar directamente a la trinchera contaminándola, dada la cercanía a la costa y las cotas del terreno inferiores a los 5 metros por lo que la inutiliza por gran cantidad de tiempo.
- Desde la superficie se produce arrastre de sedimentos hacia las trincheras, producto de la lluvia, materia orgánica de hojas de árboles y yerbas que crecen en sus bordes.
- Es posible el desarrollo de plagas como las producidas por el mosquito Aedes Aegypti.
- No hay un sistema de control, con medidores de nivel y calidad del agua, que indique en cada momento de que trinchera se puede bombear y durante que tiempo.
- Las trincheras están en forma cruciforme, por lo que no se aprovecha el sentido del flujo de descarga hacia el mar, debiendo estar perpendicular a este.
- Crecimiento de algas en las paredes de las trincheras reducen los aportes laterales e incrementan los flujos verticales favoreciendo los conos de intrusión.
- Los aerosoles pueden incrementar la salinidad del agua en las trincheras de forma directa.
- No existe una evaluación de rigor científico que permita operar adecuadamente el sistema.
- Al bombearse desde los colectores, sin impermeabilización en su fondo, se pueden inducir conos de intrusión que facilitan la salinización del agua en las trincheras.

Caso cayo Largo del Sur.

De acuerdo a López E. (2004), Cayo Largo del Sur, indicado con el número (2) en la Figura 3, tiene una longitud de 25 Km., y un ancho que varía desde 0,5 Km. en las partes estrechas hasta 3,5 Km. en las partes anchas, lo que representa un área total es de 37,5 km².

Las aguas subterráneas aprovechables se encuentran en las rocas de composición oolítica con un espesor que varía entre 10 y 13 m, las que ocupan más del 80 % del territorio del cayo, al igual que en Andros, las aguas dulces forman un lente, el que yace en equilibrio con las aguas saladas del mar y por de bajo de ellas se encuentran las formaciones cársicas

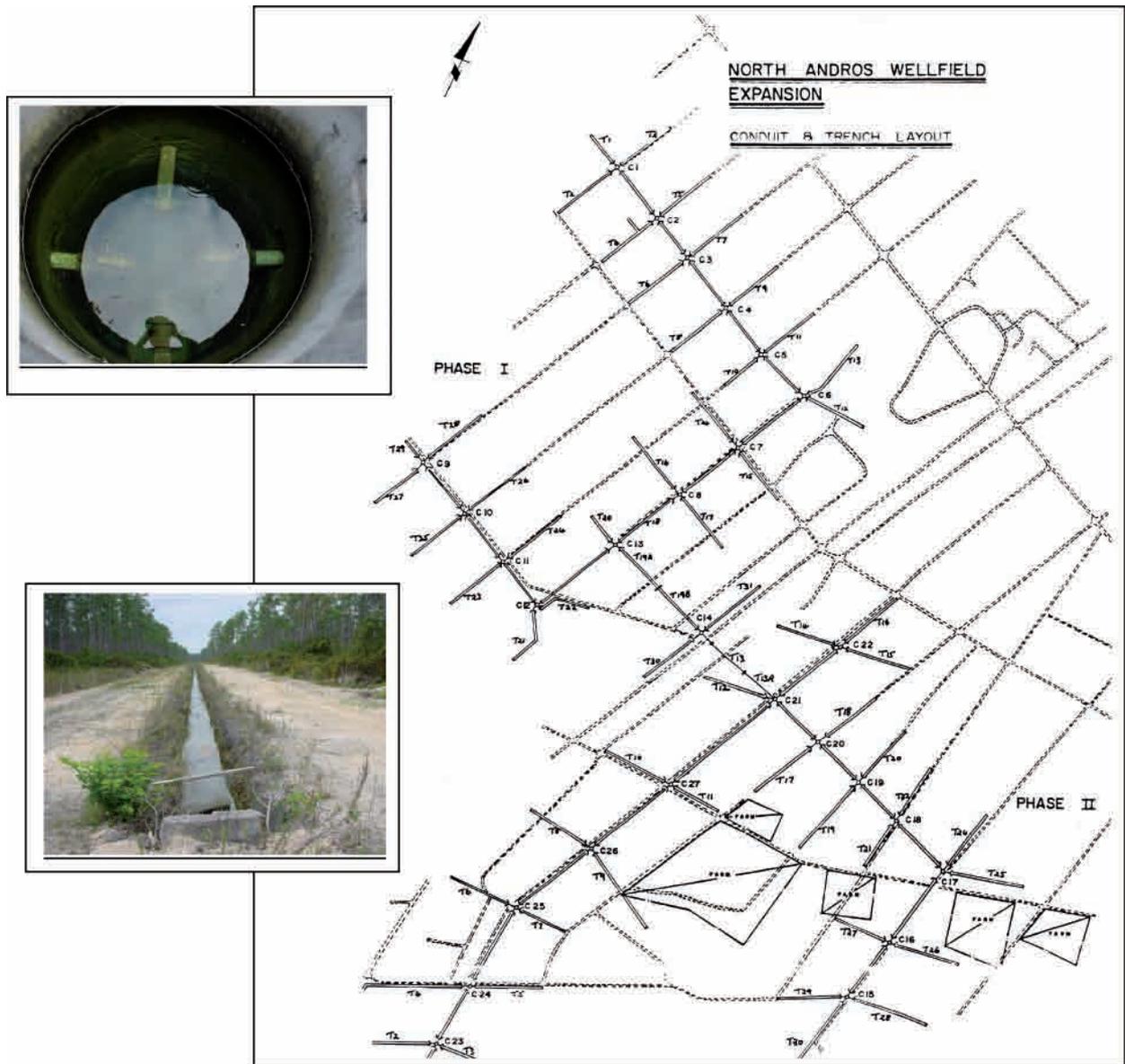


Figura 2. Características de las trincheras y colectores de las trincheras de Andros



Figura 3 Ubicación geográfica de North Andros (1), Cayo Largo (2) y Cayo Coco (3)

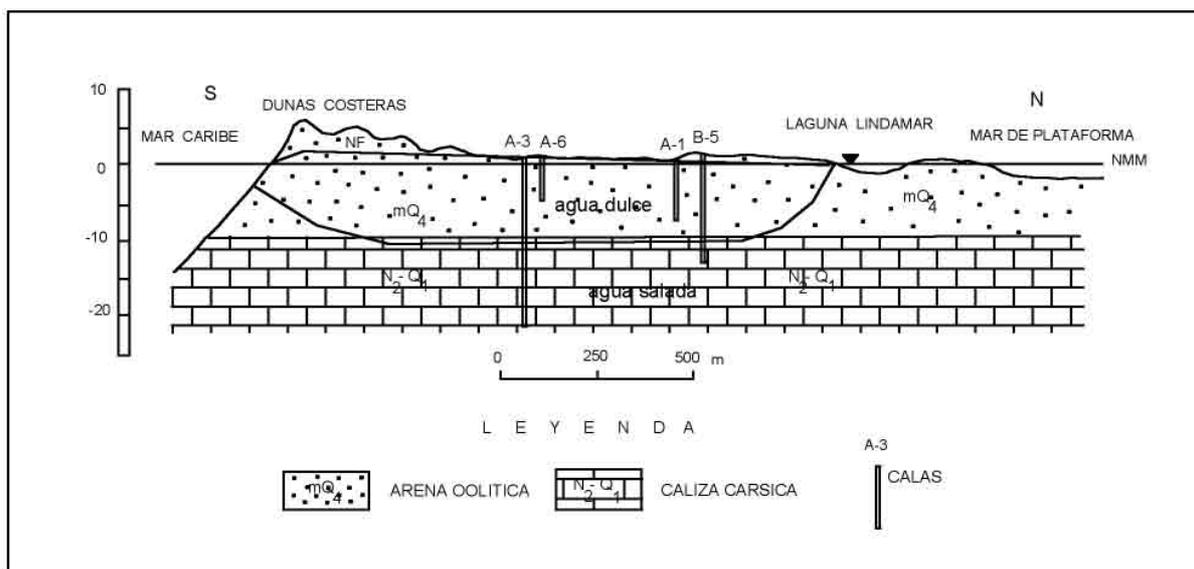


Figura 4. Corte geológico en Cayo Largo del Sur (tomado de López E., 2002).

altamente salinizadas, en la Figura 4 se muestra un corte geológico del cayo, donde se observa el lente de agua dulce sobre las aguas saladas, López E. (2002)

Según reconoce López E. (2004), las captaciones de las aguas subterráneas en Cayo Largo del Sur con un caudal total de explotación de 1400 m³/d,... ..“no han sido construidas para huracanes de gran intensidad, son zanjas o trincheras techadas con tejas de fibrocemento sensibles a vientos huracanados y a la contaminación ambiental. Una solución para el problema anterior, sería la sustitución de las trincheras abiertas por captaciones en forma de drenes soterrados, los que no son afectados por los huracanes, no modifican al medio ambiente y es más difícil su contaminación”.

En el trabajo de López E. (2002), cuando se habla de las altas difusividades hidráulicas, evidentemente se está haciendo referencia a los estratos inferiores con cierto grado de semi-confinamiento y en formaciones altamente carsificadas, donde se refleja el efecto de las mareas y se trasmite a las aguas subterráneas dulces de las rocas oolíticas, situación similar se presenta en Cayo Coco, donde las pruebas para la determinación de la conductividad hidráulica en estas últimas indicaban valores inferiores a los 5 m/d.

Problemas con las trincheras de Cayo Largo del Sur

Se repiten los mismos problemas señalados en el caso de Andros, con la diferencia que la forma del cayo no aconseja el uso de trincheras en forma cruciforme y que el uso de trincheras de gran ancho no facilita su protección y no significa un aumento apreciable en las posibilidades de captación de las aguas dulces. Otro inconveniente es que las trincheras por sus dimensiones implican modificaciones al medio ambiente natural de una zona turística

Caso Cayo Coco

Los datos que aquí se muestran fueron tomados Rodríguez V. (1989). Con el número (3) en la Figura 3, aparece la ubicación geográfica de Cayo Coco, el cual se encuentra al norte de la provincia Ciego de Ávila, limitado al norte por el Canal Viejo de las Bahamas y con una extensión de 270 Km², de relieve llano y morfología cársica. Las calas realizadas mostraron que hasta profundidades de 3 a 10 metros existen calcarenitas y bioalcarenitas y posteriormente aparecen las calizas organógenas muy cavernosas.

Los gradientes de circulación varían de $7,4 \times 10^{-4}$ a $8,5 \times 10^{-4}$, y las cotas del agua en 14 calas varían entre 0,14m y 2,98m, con un valor medio de 0,93 metros.

Las conductividades hidráulicas en las calas determinadas por el método de cubeteo y por el método de Jacob son inferiores a los 5 m/d.

Se construyeron dos baterías de pozos someros compuestas por 10 y 20 pozos. La evaluación de la primera indicó mayores incrementos en la salinidad del agua que la obtenida en una trinchera de 3m de ancho y 160m de longitud.

Desde el punto de vista económico y tecnológico, hasta profundidades inferiores a los 4 metros las trincheras de penetración parcial son superiores a las baterías de pozos someros, pero desde el punto de vista ambiental y de enfrentamiento a los eventos extremos, son preferibles los drenes horizontales.

Las relaciones entre las oscilaciones de las mareas y las fluctuaciones de los niveles de las aguas subterráneas reportados en Cayo Largo del Sur, también fueron observados en Cayo Coco, por lo que se hace muy difícil la construcción de mapas de hidroisohipsas y realización de ensayos de bombeo que no tengan en cuenta la influencia de las variaciones producto de las mareas.

Se mantienen los mismos problemas señalados a las trincheras del caso anterior.

Otros casos reportados en la literatura

En el trabajo de Singh V.S. and Gupta C. P. (1999), se presenta un modelo conceptual de la isla Kavaratti con un ancho máximo de 1,4 Km. y 5,5 Km. de largo en el mar Arábigo, existe mucha similitud desde el punto de vista hidrogeológico y se manifiestan los mismos fenómenos reportados en los casos anteriores entre las oscilaciones de las mareas y los niveles y calidades de las aguas en los puntos observados. En este caso no se utilizaron trincheras de captación, sino pozos someros de grandes diámetros entre 1 y 6 metros, profundidades entre 1 y 5 metros y el agua se encuentra entre 0,5 y 4 metros.

En el trabajo de Mailvaganam Y. et al. (1993), se demuestra que los drenes horizontales, denominados también como pozos horizontales, son factibles de construir incluso en formaciones no consolidadas, por lo que ha sido una alternativa insuficientemente utilizada en el aprovechamiento de las aguas subterráneas en los cayos y pequeñas islas amenazados por intensos huracanes, principal objetivo del presente trabajo.

PROPUESTA DE COLOCACIÓN DE DRENES HORIZONTALES EN TRINCHERAS

Conociendo la problemática de las afectaciones en las trincheras de Andros presentada por Bowleg, J.A. (2004), y en Cayo Largo del Sur mostrada por López Infante, E.D. (2004), en la reunión de GRAPHIC, celebrada en Bahamas, el autor de este trabajo presentó una ponencia donde se ilustraba un posible sistema de drenes horizontales que pueden sin un elevado costo, ser instalados en las trincheras actuales, con el objetivo de resolver la mayoría de las insuficiencias señaladas a dicho sistema de captación en el presente trabajo, Hernández A. O. (2008).

La Figura 5 fue la presentada en Nassau y requiere de los siguientes comentarios:

- En cada trinchera se colocarían tantas tuberías perforadas de PVC, similares a las camisas ranuradas de pozos verticales, de acuerdo al ancho, profundidad de la trinchera y diámetros de las tuberías.
- La tubería inferior estaría en cotas iguales o superiores a los niveles medios del mar, (NMM)

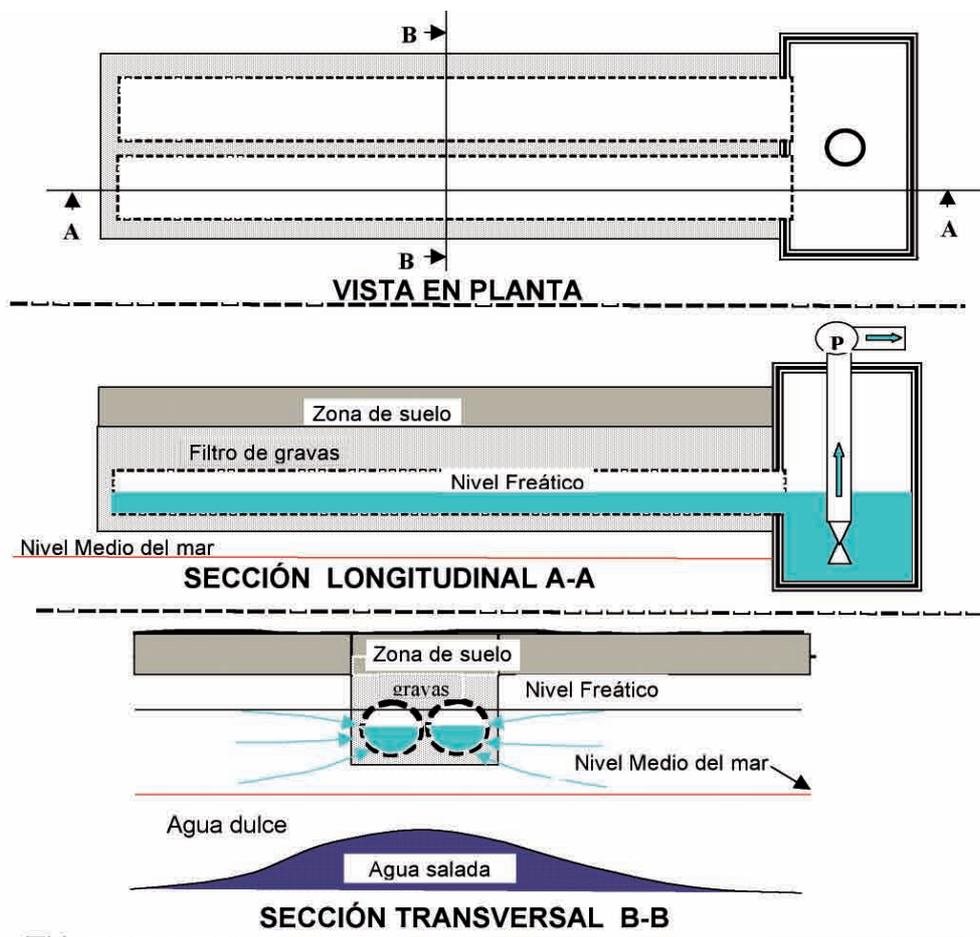


Figura 5. Esquema de colocación de drenes horizontales en trincheras abiertas

- Cada colector puede conectar dos ramales de drenes a sus lados, debiendo ser estructuras totalmente impermeables con compuertas deslizantes que regulen el nivel del agua en los drenes en cotas variables en función de las oscilaciones de la marea y que incluso puedan aislar su aporte al colector.
- Cada colector debe tener una caseta que permita colocar el sistema de mando automático para operar bombas y compuertas,

en función de la calidad y niveles del agua en el colector.

FLUJO HACIA TRINCHERAS O DRENES HORIZONTALES EN ZONAS COSTERAS SIN GRADIENTE NATURAL.

Con el objetivo de validar la posible utilización del programa AQÜIMPE, Hernández Valdés A. O. et al. (2001), y su versión sobre Windows (WinAQE),

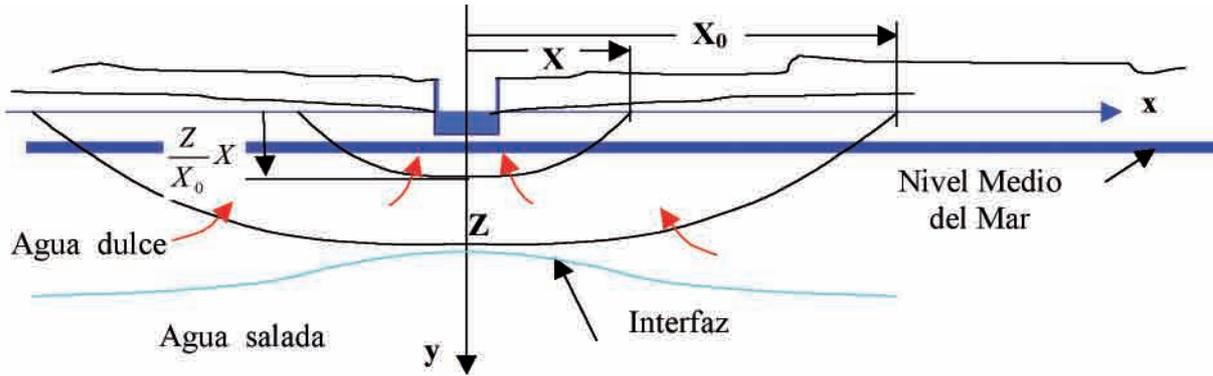


Figura 6. Esquema de cálculo en sección transversal de trinchera parcialmente penetrante

para simular el caso de Andros dentro del proyecto GRAPHIC, se realizó un modelo numérico del funcionamiento de una trinchera o su equivalente como dren horizontal y se comparó con una solución analítica desarrollada por el propio autor, considerando el efecto de la variación del agua salada y un modelo de interfaz abrupta de acuerdo a las siguientes hipótesis y esquema de cálculo.

Considerando que las superficies transversales al flujo siguen la forma de un cilindro parabólico con vértice en el eje vertical y siguiendo la siguiente ecuación:

$$y - \frac{Z}{X_0} * X = -\frac{Z}{X_0 * X} * x^2, \text{ siendo } X_0 \text{ distancia}$$

desde el centro de la trinchera hasta donde llega su influencia y Z profundidad de la interfaz de acuerdo a la ley de Ghyben Herzberg para la cota del agua en la trinchera durante el bombeo.

La longitud transversal al flujo sería:

$$S = \int_{-X}^X \sqrt{[1 + (\frac{2Z}{X_0 * X})^2 * x^2]} dx \quad (1)$$

El resultado de esta integral sería:

$$S = \left[\frac{2\beta}{\alpha} + \frac{\alpha}{4} \log\left(\frac{\beta + 1}{\beta - 1}\right) \right] X \quad (2)$$

donde; $\alpha = \frac{X_0}{Z}$ y $\beta = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{4}}$

Para el caso modelado $X_0 = 200\text{m}$, $Z=20\text{m}$, por lo que $\alpha=10$, $\beta=5.099$, por tanto

$$S = 1.45125 * X$$

De la ecuación de continuidad:

$$q = AU = S * 1 * K_D * \frac{dh}{dX}$$

donde h es la posición del nivel freático sobre el nivel del agua en la trinchera.

$$q \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{S} = K_D \int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{q}{1.45125} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{X}$$

Integrando se obtiene la siguiente ecuación:

$$h_2 - h_1 = \frac{q}{1.45125 * K_D} \ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right) \quad (3)$$

Considerando la ley de Darcy, con $K_D=50 \text{ m/d}$ y un caudal $q = 4 \text{ m}^3/\text{d/m}$,

Para una trinchera de 0,5 m de ancho y de igual profundidad del agua en ella, el perímetro mojado sería, 1,5 m, por lo que la X_1 correspondiente que genera igual superficie transversal al flujo sería de 1,0336m.

Para $X_2=200\text{m}$, $X_1=1,0336$, $h_1=0$, el valor de h_2 sería de 0,29m, similar al obtenido por la simulación.

De haberse aplicado la ecuación de Pérez Franco D. (2001), para trincheras de penetración parcial:

$$h_2 - h_1 = \frac{q}{\pi * K_D} \ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right) \quad (4)$$

El valor obtenido sería de $h_2=0.13\text{m}$, valor muy poco conservador y mas alejado de lo simulado que el anterior, ya que supone mayor área transversal al flujo.

Si se evalúa la trinchera con la fórmula propuesta por Numerov para trincheras parcialmente penetrantes, (Aravin, V.I. and Numerov, S.N. 1965.)

$$Q = K_D * S_0 \left[\frac{2(H_0 - a) - S_0}{L + 0,5A} + \frac{1}{0,5 \frac{L}{a} - \frac{1}{\pi} \ln(\sinh\{\frac{\pi A}{4 a}\})} \right] * W \quad (5)$$

Donde;

- Q caudal en (m³/d)
- K_D conductividad hidráulica de Darcy en m/d
- A ancho de la trinchera en metros.
- a distancia medida desde el fondo de la trinchera a la base del acuífero
- H₀ Espesor saturado del acuífero en metros.
- S₀ Descenso del agua en la trinchera.
- L Longitud de influencia en metros.
- W Longitud de la trinchera en metros.

De acuerdo a los datos anteriores se tendrían los siguientes valores:

W = 1m, A=0,5m, H₀ = 32m, a = 20 m, K_D = 50 m/d, Q = 4m³/d, L = 200m

Al evaluar los resultados anteriores en (5), se tendría **S₀ = 0,287 m**, valor equivalente al obtenido por la fórmula propuesta por el autor.

En las Figura 7 aparece representada, la malla utilizada para aplicar el modelo numérico con el software AQÜIMPE. Este software utiliza el Método

de los Elementos Finitos, empleando como elemento de discretización el triángulo cuadrático, por lo que la solución dentro de cada elemento es una superficie cuadrática. En el caso de acuíferos costeros considera un modelo de interfaz abrupta y que la posición de la interfaz puede ser estimada proporcionalmente a la cota del agua dulce según el modelo hidrostático de Ghyben-Herzberg.

En la Figura 7 se muestra el tramo simulado de la trinchera de 50m de longitud, considerando impermeables los límites superior e inferior por condiciones hidrodinámicas y carga fija los extremos derecho e izquierdo a una distancia de 200m del centro de la trinchera. El caudal de extracción por metro de trinchera fue el mismo que el utilizado en el modelo analítico y fue asignado a los nodos de su eje, al demostrarse que el resultado era equivalente al de distribuir la explotación en todos los nodos que definen el área de la trinchera. Se simuló desde un estado inicial horizontal hasta lograr el estado de equilibrio permanente o estacionario.

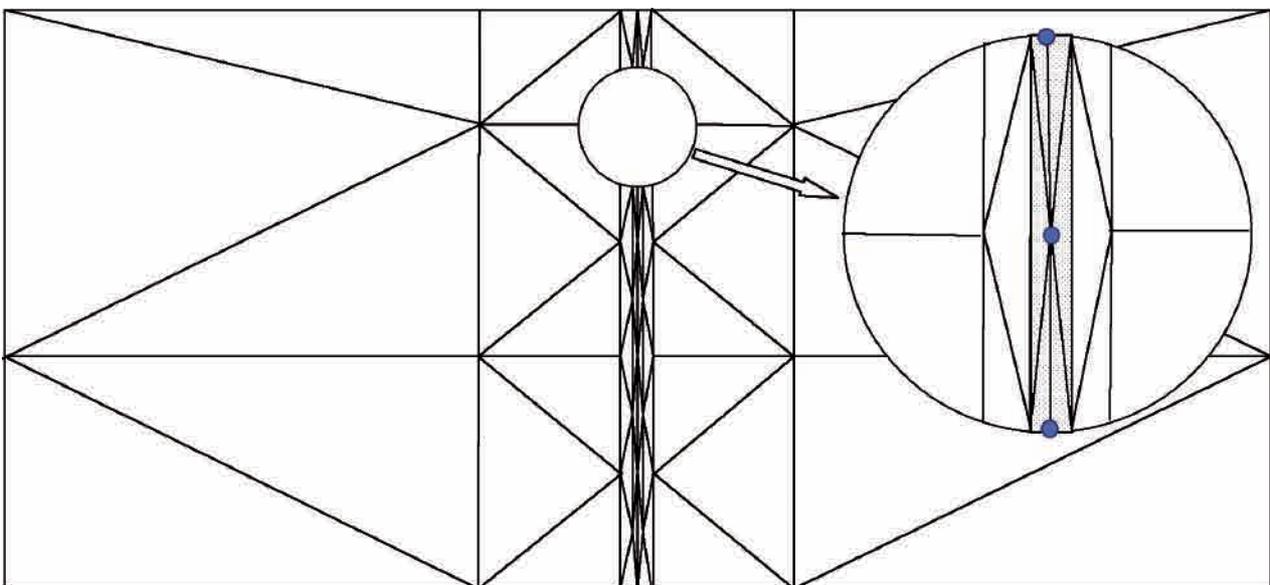


Figura 7. Vista en planta de la discretización para simular una trinchera de 50m de longitud y 50cm de ancho con el software AQÜIMPE

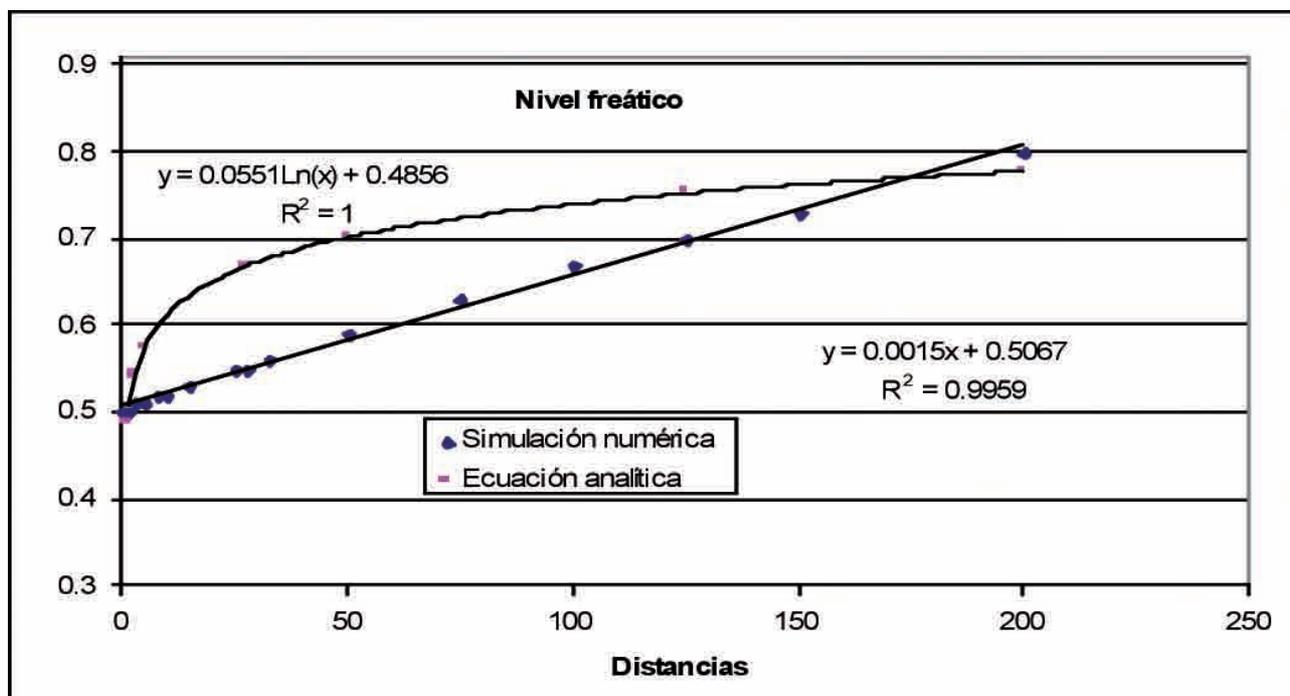


Figura 7. Niveles freáticos obtenidos a partir de las soluciones analítica y numérica

En la Figura 7 aparecen los gráficos que muestran la posición de la superficie libre del agua a partir de las cargas obtenidas por la expresión analítica propuesta y por la solución numérica.

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LAS TECNOLOGÍAS DE EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS PEQUEÑAS ISLAS

Los efectos del cambio climático en las pequeñas islas del Caribe insular, tiene varias aristas que es necesario considerar con vistas a mejorar los sistemas de captación de las aguas subterráneas. Por un lado los incrementos en las frecuencias de los eventos extremos en las manifestaciones de grandes periodos de sequías que reducirán las recargas de las aguas subterráneas y por lo tanto los espesores de los lentes de agua dulce disponibles para la explotación, los intensos huracanes afectando los sistemas de captación y por otro lado los pronósticos a largo plazo de las sobre-elevaciones del nivel del mar y los incrementos en las demandas debido al desarrollo poblacional permanente y turístico, Zack A. and Ronneberg E., 2003.

En este trabajo se ha insistido en no utilizar pozos de bombeo aunque sean someros, por los conos de intrusión asociados a los mismos y pensar en sustituir las trincheras abiertas por drenes horizontales con sistemas de control de niveles y de calidad del agua en los colectores desde donde se bombearía el agua como si fueran depósitos de almacenamiento y regulación.

Es bueno insistir en que no es suficiente para lograr la sostenibilidad de las aguas subterráneas en las pequeñas islas las modificaciones a los sistemas de

captación, sino que es necesario incluir tecnologías que mejoren la adquisición de datos, conocimiento del sistema acuífero y la modelación matemática en el diseño, operación y optimización de la explotación de estos recursos.

CONCLUSIONES

La utilización de los drenes horizontales en lugar de trincheras o pozos verticales en pequeñas islas como los casos mostrados, resulta la más conveniente obra de captación por las razones antes expuestas.

El empleo del programa AQUIMPE sobre Windows (WinAQE), para simular el sistema de trincheras o su equivalente a drenes horizontales como el caso de Andros dentro del proyecto GRAPHIC, es una alternativa factible y económica a corto plazo.

Las solución analítica presentada para simular el funcionamiento de trincheras o drenes horizontales en pequeñas islas considerando los efectos de la interfaz en la hidrodinámica del flujo, resulta ser un esquema sencillo de análisis de un problema altamente complejo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al Ing. John Bowleg II, representante de Water and Sewerage Corporation de Bahamas, por los datos aportados del sistema de captación de North Andros Wellfield, a la Dra. María Concepción Donoso, Hidróloga Regional para América Latina y el Caribe de la UNESCO, así mismo al Dr. Henrique Chaves, Coordinador Regional del programa GRAPHIC de la UNESCO, por la invitación

a participar en el taller de Bahamas, como experto representando a Cuba.

REFERENCIAS

Aravin, V.I. & Numerov, S.N. 1965 Theory of Fluid Flow in Undeformable Porous Media, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 511.

Barlow P.M. 2003. Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast. Circular 1262 U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: 2003.

Bowleg II John A.. 2004. North Andros Wellfield Report. Hurricane Frances Seawater Inundation (May-2004 Field Survey, & Storm Surveys).

Primer Taller de Expertos en Vulnerabilidad de acuíferos costeros en el Caribe Insular. Octubre 12-15. Ciudad de la Habana, Cuba.

Hernández Valdés A. O., Martínez Rodríguez J. B. Dilla Salvador F. & Llanusa Ruiz H. 2001. Modelación de Acuíferos. Texto de la Maestría de Ingeniería Hidráulica. CIH, ISPJAE,

Hernández Valdés A. O. 2008. The sustainable management of the coastal aquifers to face the climatic change. UNESCO GRAPHIC Project. Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change Launching of Andros Case Study. Nassau, March 17-19, 2008

López Infante E.D.. 2004. Efectos de los huracanes en las aguas subterráneas de Cayo Largo del Sur. Primer taller de expertos en vulnerabilidad de acuíferos costeros en el Caribe insular. Octubre 12-15. Ciudad de la Habana, Cuba.

López Infante E.D.. 2002. La influencia de las mareas oceánicas en los acuíferos de Cayo Largo del Sur. Cuba.

Groundwater and Human Development. Bocanegra, E - Martínez, D - Massone, H (Eds.) - ISBN 987-544-063-9

Mailvaganam Y., Ramli M.Z., Rushton K.R. Ong B.Y. 1993. Groundwater exploitation of shallow coastal aquifer in Sarawak, Malaysia. Hydrology of Warm Humid Regions. Proceeding of the Yakohama Symposium. July 1993. IAHS Publ. No. 216

Pérez Franco D. 1986. Flujo hacia una trinchera de captación superficial teniendo en cuenta el gradiente natural. Anais XII Congreso Latino Americano de Hidráulica. Sao Paulo, Brasil, Vol. 2, pp. 279-289.

Pérez Franco D. 2001. La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque. Editorial Félix Varela, La Habana.

Rodríguez Domínguez Venancio. 1989. Investigaciones hidrogeológicas a Cayo Coco. Trabajo de Diploma. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Facultad de Ingeniería Civil. ISPJAE. Cuba.

Singh V.S. and Gupta C. P. 1999. Feasibility of groundwater withdrawal in a coral island. Hydrological Sciences. Journal des sciences Hydrologiques, Vol 44(2). April 1999

Tarbox D.L. and Hutchings W. C.. 2008. Alternative Approaches for Water Extraction in Areas Subject to Saltwater Upconing. 20th Salt Water Intrusion Meeting 266. HSA Engineers & Scientists, Tampa, FL, USA

Zack A. and Ronneberg E.. 2003. Efficient water-supply development and management for small, arid, oceanic islands based on water use - towards the sustainable development of water and the reduction of waste". UNDESA.

http://www.sidsnet.org/docshare/other/20031105152734_CUBA.CASE_STUDY2.doc