



Información tecnológica

versión On-line ISSN 0718-0764

Inf. tecnol. v.15 n.6 La Serena 2004

<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642004000600006>

Servicios Personalizados

Revista

- SciELO Analytics
- Google Scholar H5M5 (2021)

Artículo

- Artículo en XML
- Como citar este artículo
- SciELO Analytics
- Traducción automática

Indicadores

Links relacionados

Compartir

- Otros
- Otros

Permalink

Información Tecnológica-Vol. 15 N°6-2004, págs.: 35-41

MÉTODOS NUMÉRICOS Y MODELADO

Modelado del Flujo de Agua Subterránea en la Región Nordeste de Brasil, Mediante Modelos de Simulación

Groundwater Modelling in the Northeastern Region of Brazil Using Simulation Models

C. Carvalho y M.A. Holanda de Castro

Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Univ. Federal do Ceará, Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Caixa Postal 6018, CEP 60.451-970, Fortaleza, CE-Brasil. (e-mail: carisia@ufc.br; marco@ufc.br)

Resumen

Se presenta una metodología que aplica el método de elementos analíticos para el modelado del flujo hídrico subterráneo en acuíferos regionales. El área de estudio es la región ubicada en el Valle del Cariri, parte sur del Estado de Ceará al Noreste de Brasil, que está compuesta por los municipios de Crato, Juazeiro del Norte y Barbalha. La elección de esta región se debe a posee una de las mayores reservas de agua subterránea en roca sedimentaria del Estado de Ceará y también porque el abastecimiento público de las ciudades es realizado casi totalmente con esta agua. Mediante el uso del método analítico y del método numérico, se realiza un estudio comparativo. Se analizan y comparan variables tales como grado de confianza, susceptibilidad, adecuación y exactitud. Se concluye que el modelo analítico posee elevado grado de confianza, no es susceptible a oscilaciones en el modelado, y se mostró adecuado y exacto especialmente cuando es aplicado a acuíferos regionales.

Abstract

A methodology for the application of analytical elements for simulating groundwater flow in regional aquifers is presented. The study area was the region located in the Cariri Valley, which is in the southern part of Ceara State in NE Brazil. This area includes the municipalities of Crato, Juazeiro del Norte, and Barbalha. The choice of this region for the study was due to the

fact that it possesses one of the largest reserves of groundwater in sedimentary rock in the Ceara State, and also because public water supply to these cities is almost wholly dependent on this water. A comparative study was made using the analytical and numerical methods in which variables such as degree of reliability, suitability, adequacy, and accuracy were evaluated. It was concluded that the analytical model had a high degree of confidence, was not susceptible to modelling oscillations, and was sufficiently adequate and accurate, especially when applied to regional aquifers.

Keywords: groundwater, hydrogeology, mathematical modelling, analytic element method

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de técnicas de explotación de los recursos naturales de agua subterránea y el mantenimiento de su calidad, ha tenido un significativo aumento de atención por parte de las autoridades públicas, debido a la constante amenaza potencial de contaminación del medio ambiente resultante de las actividades industriales, agrícolas, depósitos de basura, etc. Para los problemas de escasez y contaminación del agua, entre otras medidas de emergencia, durante los períodos de sequía, se suele promover programas de perforación de pozos con la intención de aumentar la oferta del agua. Como resultado de estos programas, existe una significativa cantidad de pozos profundos que exploran el acuífero.

El volumen explotable de un acuífero, es una variable de decisión a ser determinada como parte de un plan de gestión de agua como un todo. Debido a lo anterior, se hace necesario el desarrollo de modelos matemáticos que simulen el problema, y que entreguen información sobre el sistema regional de agua subterránea a bombeos y recarga artificial.

El método de elementos analíticos tiene como principio, la superposición de funciones analíticas que resuelven problemas complejos de flujo, simulando los efectos causados por cada componente o característica hidrogeológica del acuífero regional en el flujo del agua subterránea. La solución analítica compuesta, es una combinación de numerosas soluciones elementales que involucran los elementos analíticos para el flujo regional (ríos, lagunas, pozos, flujo uniforme, etc) y satisface la ecuación diferencial que gobierna el flujo en cualquier punto del dominio, teniendo como consecuencia la garantía de la continuidad del flujo. Las cargas hidráulicas y las velocidades del flujo del agua subterránea son definidas en cualquier punto en el dominio en estudio; de esta manera, no hay dispersión numérica resultante de la imprecisión del cálculo de las velocidades del flujo ([Strack, 2003](#)).

El objetivo principal de este trabajo, es contribuir a la solución de los problemas, que involucran el modelado matemático del flujo hídrico subterráneo, mediante del desarrollo de una metodología conveniente, aplicando del método de elementos analíticos en acuíferos regionales.

Además, se comprueba el grado de confiabilidad del modelo a través de un análisis comparativo de los resultados, en el mismo acuífero, aplicando el modelo analítico SPLIT ([Jankovic', 2001](#)), Versión 2.3, 2001 y VISUALBLUEBIRD (VBB)-Versión 28/08/2002, ([Craig, 2002](#)), y un modelo numérico tradicional que utiliza el método de diferencias finitas, MODFLOW - Versión 2.7 ([McDonald y Harbaugh, 1988](#)).

A continuación, se describen tres ejemplos de aplicaciones únicas y adecuadas del método de elementos analíticos:

1) En 1995, el Servicio de Salud de la ciudad de Marion (Indiana - USA), suspendió la operación de todos los campos de pozos públicos de suministro del agua de la ciudad, hasta que las zonas de protección de sus cargas fuesen apropiadamente delineadas para cada campo. El Centro de Medio Ambiente y Seguridad Urbana de Indianapolis, sugirió completar las cinco zonas de captura de los pozos en un período de 6 meses utilizando el método de elementos analíticos ([Wittman y Haitjema, 1995](#)). Las propuestas basadas en los procedimientos de los modelos tradicionales (numéricos) solo pudieron alcanzar estas condiciones en un plazo de tiempo mayor y a un costo más elevado. Una discusión, más detallada sobre los aspectos técnicos y políticos de este trabajo, puede ser encontrada en Lindsey et al. ([1997](#)) y en Haitjema et al. ([1995](#)).

2) Michell-Bruker en 1993 ([Mitchell-Bruker y Haitjema, 1996](#)), utilizó el modelo analítico para la solución de flujo conjunto de agua de superficie y subterránea. Las interacciones de agua de superficie y subterránea están en estado permanente y están basadas en los niveles de agua de los ríos que son constantes en el tiempo e independientes de las tasas de flujo modeladas de los ríos. Los resultados para las cargas hidráulicas de algunas corrientes, indicaban si las secciones de ríos reciben o no agua subterránea, por lo menos, en promedio, durante el año. El flujo de base modelado es comparado con el flujo de base medido en varios puntos del dominio, y esta comparación es acordada con las de las cargas modeladas y medidas, lo que lleva a una significativa mejora de la calibración del modelo comparado a solamente a la calibración de cargas.

3) Al final de los años 1980 el Instituto de Tratamiento de Agua y Residuos del gobierno Holandés, en cooperación con el Instituto de investigación Delft, comenzaron a desarrollar el Modelo Nacional de Agua Subterránea-NAGROM ([De Lange, 1991](#)). Éste fue implementado con el modelo de elementos analíticos de acuíferos múltiples MLAEM, desarrollado por Strack ([1989](#)). El dominio del modelo es de aproximadamente 250 x 400 km y está constituido por tres acuíferos interconectados. El método de elementos analíticos tornó este modelado posible, y sirve como base para muchos estudios de flujo local subterráneo ([De Lange y Van Der Meij, 1994](#)). El modelo NAGROM ha sido asociado a muchos otros modelos, incluyendo modelo de flujo no saturado y modelo ecológico, para formar un sistema múltiple de modelado. Un sistema de modelado que agrupa varios modelos, conjuntamente con el método de elementos analíticos, que simula el flujo saturado, ha sido sugerido por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA).

METODOLOGÍA

El método de elementos analíticos es aplicado en un área total y en una porción de ésta, el área de interés, y el modelo

numérico de diferencias finitas solo se aplica en el área de interés. El acuífero escogido para esta comparación pertenece a la Región del Cariri, que involucra las ciudades de Crato, Juazeiro del Norte y Barbalha, insertada en la Llanura del Araripe y gran parte del Valle del Cariri, localizada en la Cuenca del Araripe, al sur del Estado del Ceará, Nordeste del Brasil.

Existen varias razones que llevan la elección de esta área en especial, la más importante se debe al hecho de estar constituida por rocas sedimentarias, que poseen los mejores sistemas acuíferos del Estado, donde están almacenadas reservas significativas de agua, de buena calidad, abasteciendo casi que 95% de los municipios a través de pozos tubulares.

Otra razón, esta basada en estudios anteriores, que demostraron la preocupación de la explotación desordenada de las aguas subterráneas, lo que comprometía el potencial cuantitativo y cualitativo del acuífero, localizado en zonas de alto riesgo de contaminación ambiental y, también con la probabilidad de que las aguas bombeadas por algunos pozos sea una mezcla de paleoaguas (aguas antiguas) de la Formación Missão Velha, con aguas pluviales recientes infiltradas directamente en el Valle, de la Formación Rio da Batateira.

El área de la región es de 1.788,4 km² (Crato, 1.117,5 km²; Juazeiro del Norte, 219 km²; Barbalha, 451,9 km²). El área de interés queda a 538 km de la capital, Fortaleza, en las coordenadas 07° 10' e 07° 25' S, 39° 10' y 39° 30' W, estando constituida por parte de los municipios de Crato, 170 km², Juazeiro del Norte, 102 km² y Barbalha, 158 km², sumando un área total de aproximadamente 430 km².

Los valores medios de los parámetros hidrogeológicos del acuífero (sistema acuífero medio) son los siguientes: transmisividad del acuífero confinado: $7,9 \times 10^{-3}$ m²/s; conductividad hidráulica: $7,32 \times 10^{-5}$ m/s; coeficiente de acopiamiento: $1,36 \times 10^{-3}$ y porosidad efectiva: 20 %.

Fue analizado por Veríssimo (1999), un total de 548 pozos en el área de interés que están distribuidos en la proporción de 25,2 % en Barbalha, 32% en el Crato y 42,8% en Juazeiro del Norte, con densidad de 1,3 pozo/km². La totalidad de las pozos del sistema acuífero posee valores medios de profundidad y capacidad específica de 88 m y 2,7 (m³/h)/m respectivamente, produciendo los mayores flujos de bombeo observados en el área, llegando hasta 300 m³/h en Crato. La razón media de consumo "per capita" en la región es de aproximadamente 340 l/hab./día.

La selección de las pozos para el modelado regional (área total), y para la primera local (área de interés) reduce el número de 548 pozos a un total de 50, utilizando los siguientes criterios: (1) son desechados los pozos que están fuera de uso, no instalados, sin datos suficientes o abandonados; (2) son seleccionados las pozos que son utilizados para abastecimiento público de los tres municipios, y (3) son escogidos aquellos que tienen flujos de bombeo mayores a 12 m³/h.

El modelado de la Región, que comprende el área total, considera la inclusión de los siguientes elementos hidrológicos: 50 pozos de abastecimiento público, 44 fuentes naturales localizadas en el base de la Llanura del Araripe (Crato y Barbalha), con flujo total de 2.364 m³/h; 2 lagos y 19 cursos de agua, entre ríos y riachuelos. Parte de ésta corresponde al área de interés, la cual ha sido utilizada como base para el análisis comparativo las sedes de los 3 municipios, que poseen 50 pozos seleccionadas y los principales ríos (2) y riachuelos (2).

Las propiedades del acuífero son las mismas tanto para el modelado en escala regional, como local y estas son: anotación de la base del acuífero = 0 m; espesor del acuífero (saturada) = 110 m; conductividad hidráulica regional = 0,264 m/h y porosidad efectiva = 0,2.

Son utilizadas series de elementos analíticos distintos para cada tipo de modelado. Para la área de interés los elementos analíticos utilizados son los siguientes: 50 pozos tubulares en el sistema acuífero medio con tasas de bombeo conocidas; 2 ríos y 2 riachuelos, de carga hidráulica y gradientes, i: Rio da Batateira, i = 0,00122 m/m; Rio Salamanca, i = 0,00038 m/m; Riachuelo Fondo, i = 0,00358 m/m y Riachuelo de los Monos, i = 0,00358 m/m.

Para la área total, además de las 50 pozos, son considerados los lagos Azud Thomás Osterne (28.780.000 m³) y Manuel Balbino (37.180.000 m³) y las 44 fuentes naturales. Los ríos y riachuelos suman un total de 19 y se supone que están en contacto directo con el nivel freático, alimentando la reserva subterránea de agua. Entre los más importantes, se cita: Rio Carás, de la Batateira, Salamanca, Grangeiro, Salgadinho, Riachuelo Fundo, de los Macacos, del Jardim, de los Carneiros y Santana.

El elemento área de recarga, es considerado solamente para la simulación en el área de interés, que posee área igual a 25.600 m x 16.800 m. La recarga del sistema acuífero medio se puede realizar de dos maneras: (1) por infiltración directa por las aguas de las lluvias y (2) por contribución de las fuentes naturales. El valor de la tasa de recarga, según Mont'Alverne et al. (1996), debido a la precipitación (970 mm/año) en la región es igual a $109,74 \times 10^6$ m³/año. Considerándose la contribución de las fuentes del sistema acuífero superior (Formación Exu/Arajara), que sale superficialmente sobre los pozos del pediplano, propiciando una infiltración de parte de esa agua superficial. Este valor puede ser evaluado y es aproximadamente de $2,32 \times 10^6$ m³/año.

Sumándose las dos contribuciones se llega la recarga total de $112,06 \times 10^6$ m³/año. La recarga total distribuida en toda el área de estudio resulta en una tasa de 0,0000297 m/h. El modelado utilizando el programa MODFLOW, es realizada solamente para la área de interés

con 50 pozos. El análisis comparativo y los datos de entrada utilizados son los mismos para el método analítico.

Las diferencias principales son las siguientes: los ríos (2) y los riachuelos (2) entran como condición de contorno del tipo carga constante especificada en todo el trayecto y una discretización del dominio que resulta en una malla de 300 x 300 unidades, quedando el tamaño de la celda aproximadamente igual a 85 x 56 metros (área = 4.760 m²).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas equipotenciales calculadas por el método de elementos analíticos (SPLIT/VBB), de toda región indican ([Figura 1](#)), que es posible tener una visión global de la distribución regional de las cargas hidráulicas del acuífero. Los datos de entrada, utilizados en la aplicación del método de diferencias finitas, mediante el programa MODFLOW en la área de interés, son los mismos utilizados en el SPLIT /VBB. Ante la indisponibilidad de los datos de resistencia de la base de los ríos, los 2 ríos y los 2 riachuelos son representados en este modelo, como condiciones de contorno equivalentes a las cargas hidráulicas constantes.

Para esta simulación son utilizados los 50 pozos de abastecimiento público de las ciudades. La [Figura 2](#) muestra una sobreposición de las líneas equipotenciales calculadas por el SPLIT/VBB y por MODFLOW para fundamentar el análisis comparativo entre los dos métodos en la área de interés. En el gráfico de sobreposición de los resultados del modelo analítico y del modelo numérico, puede observarse que, en el modelo numérico el valor máximo de la equipotencial es igual a 130 metros y el valor mínimo es 105 metros y, en el modelo analítico, el valor máximo de la equipotencial es igual a 129,1586 metros y el valor mínimo es 104,7554 metros, con una diferencia de 0,8414 m y 0,24446 m, respectivamente, entre los valores de las cargas, aunque, de un modo general, en los dos trazos, las curvas equipotenciales tengan la misma inclinación. De acuerdo con la [Figura 2](#), es posible calcular la diferencia relativa entre los valores de los volúmenes de agua almacenada para los dos modelos en la misma área. El resultado logrado para esta diferencia, que también puede ser llamada de error relativo entre los dos modelos, entrega un valor cercano el 3,8 %.

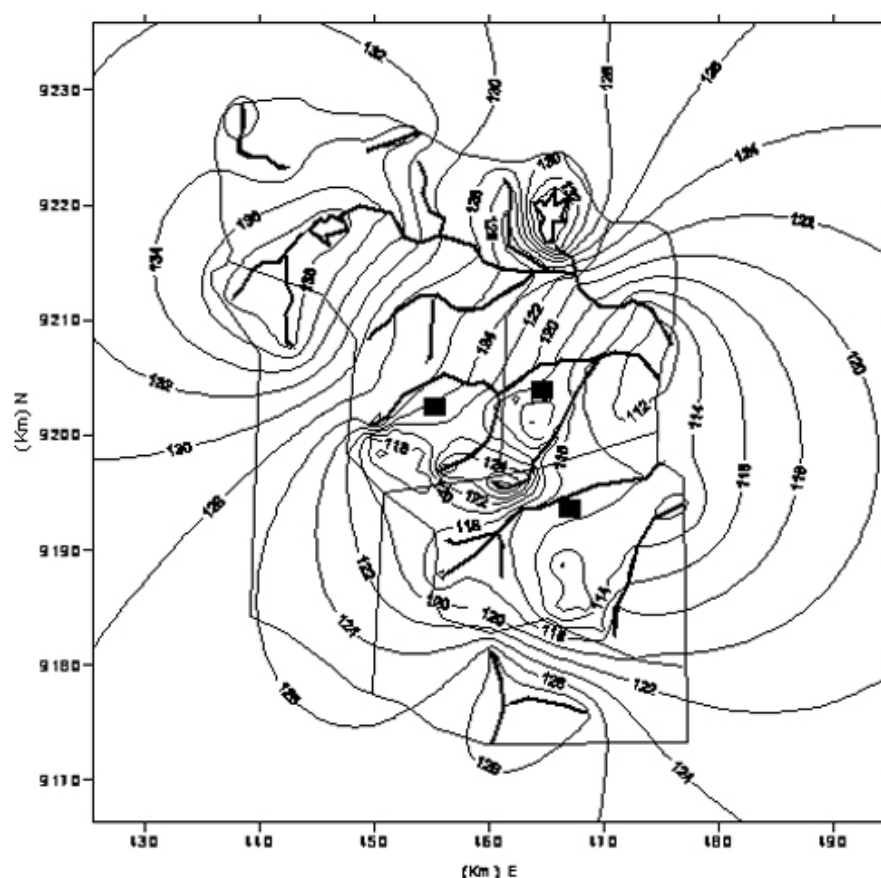


Fig. 1: Curvas equipotenciales, de 2 x 2 metros, para la Región del Cariri (área total) (SPLIT/VBB).

Para suplir esta deficiencia de los modelos numéricos, el método de elementos analíticos, como fue mostrado en las simulaciones, es adecuado para dominios regionales. La aplicación regional, en el área total, mostró que el modelo analítico puede servir como herramienta para el logro de condiciones de contorno para el perímetro externo del área menor, o sea, de un modelado más detallado del acuífero a través de modelos más complejos, como el programa MODFLOW.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, en este estudio, se concluye que:

- (1) El método de elementos analíticos es una importante alternativa para el modelado matemático de flujo hídrico

subterráneo.

(2) Con esto se obtiene mejor conocimiento y control de los acuíferos regionales del Nordeste Brasileño, pues mejora la deficiencia de los métodos numéricos con relación a la modelado de acuíferos de grandes dimensiones o regionales.

(3) Para la creación de una metodología de aplicación de este modelo fue necesario escoger una región que permitiese una visión global de la situación real del conjunto de sus recursos hídricos, como es el caso de la Cuenca Sedimentaria del Cariri que posee una de las mayores reservas acuíferas del Estado y que presenta problemas de explotación no controladas con desaprovechamiento y contaminación de los recursos hídricos.

(4) La aplicación de los programas SPLIT y VISUALBLUEBIRD y MODFLOW en el área de interés, suministró resultados y informaciones relativas de varios aspectos en el campo del modelado.

(5) Se verificó, a través de las diversas simulaciones, que el método de elementos analíticos, permite la variación de la escala de detalles, lo que implica que éste puede ser aplicado tanto a un tratamiento regional como local, sin perjuicio de la precisión de los resultados del modelo.

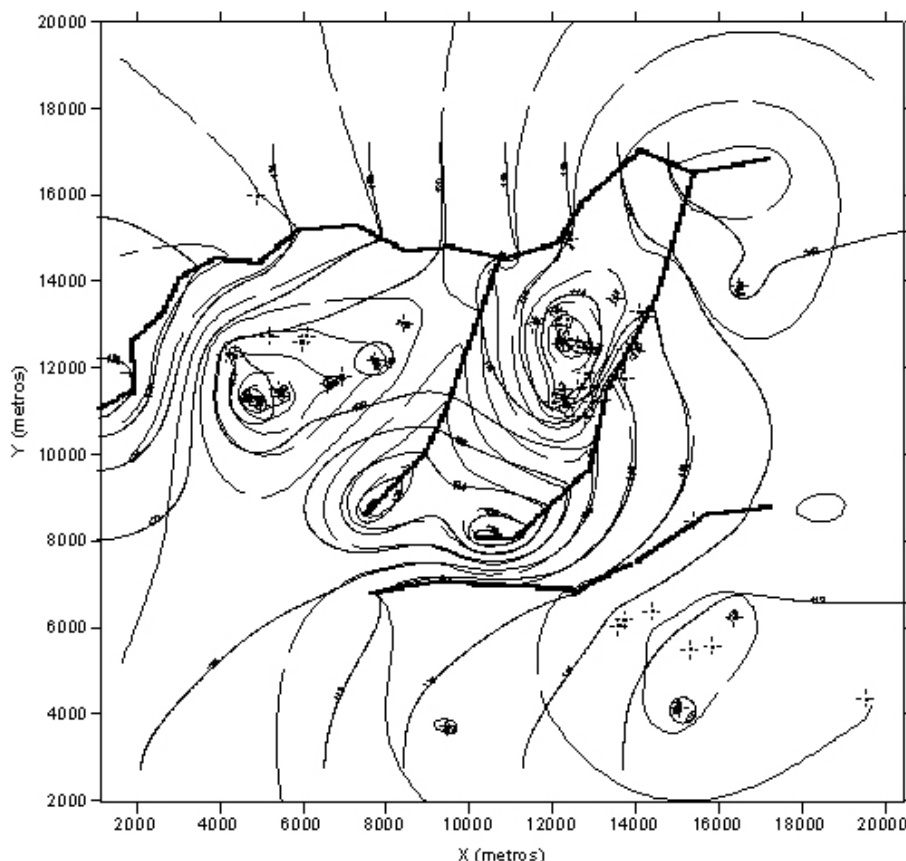


Fig. 2: Sobreposición de las líneas equipotenciales (metros) calculadas por SPLIT/VBB (---) y por MODFLOW (—) en el área de interés.

REFERENCIAS

Craig, J. VBB Manual. Depart. of Civil, Structural and Environmental Engineering. University at Buffalo, USA. Disponible en: <http://www.groundwater.buffalo.edu>. Acceso en: 20 Nov. (2002).

De Lange, W.J. A groundwater model of the Netherlands. Amsterdam: The National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment - RIZA. Technical Report Note 90.066 (1991).

De Lange, W. J.; J.L Van Der Meij. Reports on NAGROM. Delft. The National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment-RIZA. Technical Report. TNO-GG (1994).

Haitjema, H.M.; O.D.L Strack; S.R Kraemer. Demonstration of the analytic element method for wellhead protection. Ada, OK: U.S. Environmental Protection Agency. Project Summary - EPA/600/SR-94/210 (1995).

Jankovic', I. SPLIT Manual - Version 2.3. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering. University at Buffalo, USA. Disponible en: <http://www.groundwater.buffalo.edu>. Acceso en: 05 Jun. (2001)

Lindsey, G.; J Wittman; M. Rummel. Using indices in environmental planning: evaluating policies for wellhead protection. *Journal of Environmental Planning and Management*, Tyne, UK, 40 (6), 685-703 (1997).

McDonald, M.G.; A.W. Harbaugh. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Washington: Techniques of Water Resources Investigations of the E.U.A. Geol. Survey. Book 6. Chap. A1 (1988).

Mitchell-Bruker, S.; H.M. Haitjema. Modeling steady state conjunctive groundwater and surface water flow with analytic elements. *Water Resources Research*, Washington D.C., 32 (9), 2725-2732 (1996).

MontAlverne, A.A.F y otros 8 autores. Projeto avaliação hidrogeológica da bacia sedimentar do Araripe. Fase I. Recife: DNPM. 101 p. II (1996).

Strack, O.D.L., *Groundwater mechanics*. New Jersey: Prentice-Hall, 732 p. (1989)

Strack, O.D.L., *Theory and Applications of the Analytic Element Method*. American Geophysical Union-Rev. Geophys., 41(2), 1005 (2003)

Veríssimo, L.S., A importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento sócioeconômico do eixo CRAJUBAR, Cariri Ocidental - Estado do Ceará. 140 f. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia) - Pósgraduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. (1999).

Wittman, J.; Haitjema, h.m., Delineation of wellhead protection areas in Marion County, Indiana. Indianapolis: Center for Urban Policy and the Environment-CUPE,. Technical Report 95-E14 (1995)



Todo el contenido de esta revista, excepto dónde está identificado, está bajo una [Licencia Creative Commons](#)

Monseñor Subercaseaux 667

La Serena - Chile

Tel.: (56-51) 2551158

Fax: (56-51) 2551158



citrevistas@gmail.com