

# MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA SUB-CUENCA DE EL ACUÍFERO LEÓN-CHINANDEGA.

Autor: MSc. Heyddy Calderón Palma

Institución: Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos CIRA UNAN Managua

## Palabras claves:

*estado no estacionario, Visual MODFLOW, extracción de agua subterránea, flujo base.*

## Resumen

El acuífero León-Chinandega está ubicado en una planicie agrícola al Noroeste de Nicaragua. Este acuífero libre y somero de 1300 km<sup>2</sup> de extensión, es uno de los reservorios de agua subterránea más importantes del país. Una sub-cuenca de 330 km<sup>2</sup> fue seleccionada para estudiar el flujo de agua subterránea usando un modelo numérico (Visual MODFLOW). Un modelo en estado estacionario y el primer modelo en estado no estacionario fueron construidos basados en el modelo conceptual desarrollado. Se identificaron dos sistemas de flujo, el primero es un sistema regional profundo, que se recarga en la cordillera de los Marrabios y descarga en la planicie. El segundo es un sistema local y somero, recargado en la planicie y que descarga a menores elevaciones. La relativa estabilidad de las cargas hidráulicas en el sistema se debe al control que ejercen los ríos, estos se alimentan fundamentalmente de agua subterránea. Por otro lado, el flujo base en los ríos es muy sensible a los cambios en el sistema. El incremento en la extracción de agua subterránea causa el descenso de la descarga en los ríos, lo cual es muy crítico durante períodos secos. El corto tiempo de respuesta del acuífero (1 año) permite elaborar estrategias de manejo con resultados a corto plazo, usando

simulaciones realizadas con este modelo que permitan establecer el balance entre el desarrollo deseable del acuífero y la sostenibilidad del recurso de agua subterránea.

## Introducción

Los departamentos de León y Chinandega tienen una extensión aproximada de 2500 km<sup>2</sup> y concentran alrededor del 16% de la población del país. En esta región de suelos volcánicos fértiles, la agricultura es la actividad económica más importante. A pesar de que el acuífero ubicado en esta región tiene un enorme potencial (Naciones Unidas, 1974) la agricultura depende en la mayoría de los casos de la estación lluviosa debido a la falta de recursos para explotar el agua subterránea. Se ha estudiado la disponibilidad del recurso para su uso en la agricultura bajo riego (INETER, 2000; Naciones Unidas, 1974) pero sin considerar los efectos del aumento en la extracción. La calidad del agua subterránea ha sido estudiada y se ha encontrado contaminación por pesticidas asociados al cultivo del algodón, aun cuando esta actividad cesó en los 1980's (Centro Humboldt, 2000; CIRA, 1999 a y b; Briemberg, 1994).

El objetivo de este trabajo es estudiar el flujo de agua subterránea en una sub-

cuenca del acuífero León-Chinandega usando un modelo numérico. Para esto, primero se necesitaba entender las condiciones del acuífero y a partir de ese entendimiento, desarrollar un modelo conceptual integral que fuera la base para construir un modelo numérico capaz de reproducir esas condiciones. Una vez que se entendió la dinámica del sistema, el siguiente paso fue investigar la respuesta del acuífero a cambios en las condiciones a las que está sometido. Tales cambios incluían un aumento en el volumen de agua subterránea extraído.

### Diseño Metodológico

La sub-cuenca seleccionada para esta investigación tiene 330 km<sup>2</sup> y coincide aproximadamente con la cuenca del Río Posoltega (Figura 1). El área de estudio posee las principales características geológicas e hidrogeológicas del acuífero y la presencia de los Ríos Sucio y Telica facilitaron su delimitación. Otro importante factor que se consideró para esta selección fue la disponibilidad de información existente, ya que un modelo numérico requiere grandes cantidades de datos.

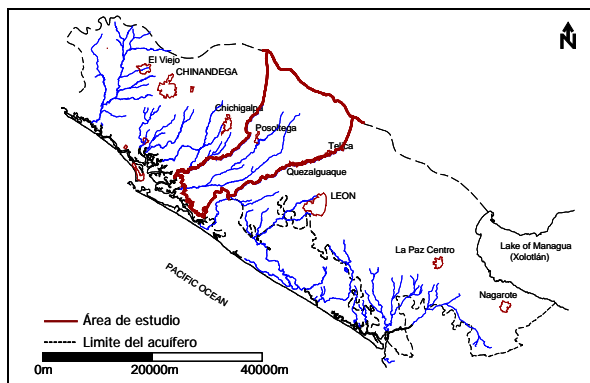


Figura 1. Ubicación del área de estudio dentro del acuífero

La metodología usada sigue el protocolo sugerido por Anderson y Woessner (1992) para el modelamiento numérico. Los primeros dos pasos en el protocolo son el desarrollo del modelo conceptual y la selección del programa a usarse. El modelo conceptual es una representación idealizada del sistema físico y fue desarrollado basándose en información previa y nuevos datos recolectados durante esta investigación. La selección del programa computacional fue hecha basada en la amplia aceptación de Visual MODFLOW en el campo del modelamiento de flujo subterráneo y la numerosa documentación disponible que respalda el uso de este programa (USGS, 1997). Los siguientes pasos en este protocolo de investigación son:

1. Diseño del modelo, donde el modelo conceptual desarrollado es traducido a lenguaje de computadora.
2. Calibración del modelo, consiste en encontrar un conjunto de parámetros, limitados a un rango razonable, capaz de reproducir las condiciones reales del sistema.
3. Análisis de sensibilidad para establecer los efectos de las incertidumbres en el modelo calibrado.
4. Verificación del modelo usando los parámetros calibrados para reproducir un segundo conjunto de mediciones.
5. Predicción de la respuesta del sistema a eventos futuros
6. Presentación del diseño del modelo y resultados.

### Resultados y Discusión Modelo Conceptual

El modelo conceptual define cuatro unidades hidroestratigráficas para el acuífero (Figura 2). Una unidad

hidroestratigráfica se define como unidades geológicas con propiedades hidrogeológicas similares. El modelo tiene tres unidades acuíferas y una unidad impermeable que corresponde al basamento.

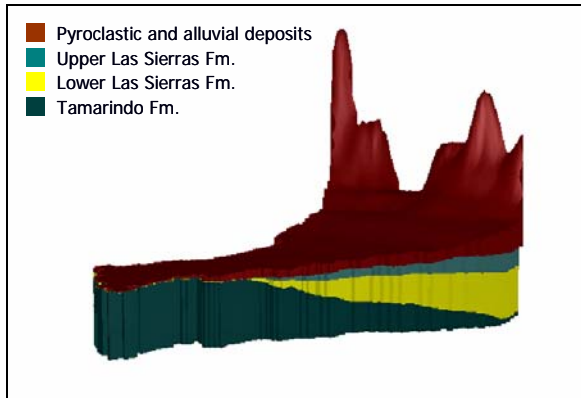


Figura 2. Unidades hidroestratigráficas

Los valores de conductividades hidráulicas (K) correspondientes a cada unidad fueron determinados mediante el análisis de pruebas de bombeo y se definieron además zonas de igual conductividad, ubicando espacialmente los pozos de bombeo y produciendo contornos de igual K con la ayuda de Surfer 7.0. Los valores obtenidos para las primeras dos capas fueron ajustados durante la calibración. La Fm. Las Sierras fue dividida en dos unidades basándose en las diferencias entre las K de la parte superior e inferior. Debido a la mayor compactación sufrida por la parte inferior, los valores de K son menores en esta unidad que en la superior.

Los límites del modelo están definidos por la divisoria de flujo subterráneo representada por la Cordillera de los Marrabios, los ríos Sucio y Telica, el límite de los manglares y líneas de flujo (Figura 3).

El modelo conceptual considera la recarga natural, causada por la

infiltración de la precipitación y recarga artificial, causada por las pérdidas en el sistema de distribución y los sistemas de riego. Se consideran tres zonas de recarga natural: la costa, la planicie y la cordillera.

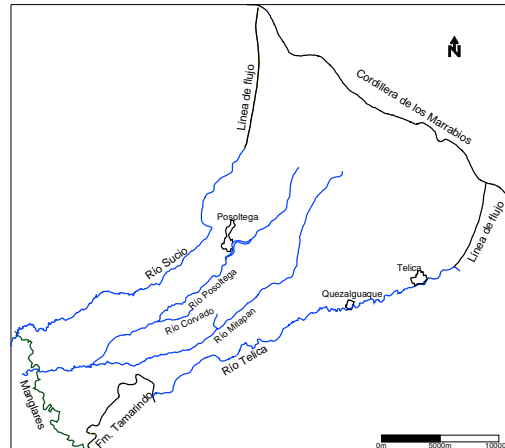


Figura 3. Límites del modelo

Los estimados de recarga se basan en un estudio previo (INETER, 2000) que considera tipo de suelo, topografía y cobertura vegetal. Los valores iniciales usados en el modelo fueron los estimados en ese estudio, pero los valores para las zonas 2 y 3 fueron ajustados durante la calibración. La recarga artificial se asumió como un 10% del total de agua extraída y solo se aplicó en la zona 2 debido a la escasez de pozos en las zonas 1 y 3.

### Calibración

El modelo en estado estacionario fue calibrado para las condiciones existentes en 1999 y fue verificado con datos de 1965-1975. Los datos usados para la calibración del modelo en estado no estacionario corresponden a 1971. El gráfico de calibración para 1999, (Figura 4) muestran una buena correlación entre las cargas hidráulicas (h) simuladas por el modelo y las observadas en el campo, esto indica que el modelo es capaz de reproducir

satisfactoriamente las condiciones reales del sistema físico. El error medio absoluto, que representa la discrepancia entre  $h$  calculadas y observadas, fue de 3.5 m para 1999, lo cual es considerado altamente satisfactorio dada la escala regional del modelo. Además de valores de  $h$ , se utilizaron mediciones de flujo en el Río Posoltega y mapas de equipotenciales para la calibración. Las equipotenciales estimadas por el modelo coinciden con mucha precisión con las observadas. El flujo del río fue también reproducido por el modelo en estado estacionario y el modelo no estacionario replicó las fluctuaciones de flujo a lo largo de la época seca y la lluviosa.

El uso de diferentes objetivos de calibración y la verificación del modelo refuerzan la confiabilidad en los resultados de las simulaciones.

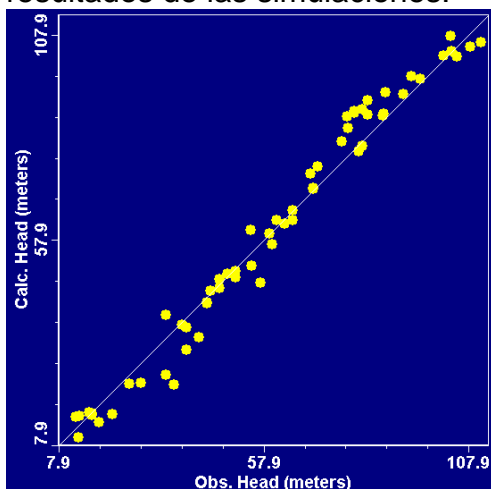


Figura 4. Calibración del modelo (1999)

### Análisis de Sensitividad

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo para todos los parámetros del modelo con el fin de determinar aquellos que ejercen mayor influencia en los resultados. Se encontró que el modelo es más sensible a la influencia combinada de la recarga y  $K$ . El error

aproximado en los estimados de recarga es de 25% mientras que el de  $K$  es menor a 1 orden de magnitud, lo que es bastante bueno considerando los amplios rangos de variación de este parámetro (Freeze and Cherry, 1979). El análisis permitió determinar que el monitoreo del flujo base es esencial para restringir más los estimados de  $K$  y recarga y así aumentar la precisión de las simulaciones.

### Simulaciones

El flujo de agua subterránea hacia pozos fue simulado usando la técnica de Particle Tracking. Se encontró que los pozos profundos captan agua del sistema de flujo regional, que es recargado en la cordillera. Por otra parte, los pozos someros captan una mezcla de agua del flujo regional y el flujo local. El bombeo causa una disminución del caudal de los ríos en el sistema, como se comprobó mediante el análisis del balance de masa producido por el modelo.

Se simularon tres escenarios para analizar el efecto del bombeo: 1. Extracción nula, 2. Condiciones actuales y 3. Incremento del 100% en la extracción (Figura 5). Se observó que el aumento en la extracción causa una disminución en el caudal de los ríos. Esto es consecuencia de la disminución del volumen de agua subterránea descargado en ellos y de la descarga inducida por el bombeo desde los ríos hacia el acuífero. La simulación en estado no estacionario estableció que este efecto es muy crítico durante los períodos secos, cuando el flujo base disminuye considerablemente. Dicho efecto no es apreciable usando sólo simulaciones en estado estacionario, ya que estas proporcionan un promedio del

flujo base a lo largo del año y no muestran el crítico descenso en el flujo que ocurre en el verano y la canícula, cuando la extracción de agua subterránea es mayor.

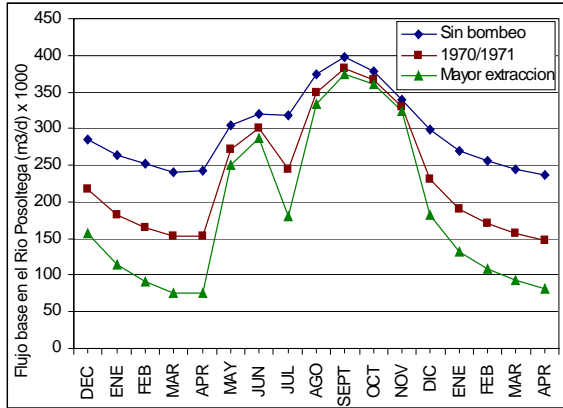


Figura 5. Efecto del bombeo en el flujo base

### Conclusiones y Recomendaciones

Las cargas hidráulicas están controladas por los ríos en el sistema, por lo que los cambios en las condiciones de bombeo y recarga producen solo ligeros cambios en las equipotenciales. Sin embargo, el flujo base en los ríos responde drásticamente al aumento del bombeo y cambios en la recarga, especialmente durante períodos secos. El aumento en la extracción de agua subterránea induce descarga desde los ríos hacia el acuífero y disminuye el flujo base, reduciendo así el flujo total del río. La sensibilidad del flujo base a cambios en los parámetros del modelo indica que el monitoreo continuo de los ríos es fundamental para mejorar la precisión del modelo.

Las simulaciones en estado no estacionario muestran que el aumento en la extracción de agua subterránea afecta críticamente el flujo base durante la época seca. La ausencia de escorrentía y los altos volúmenes de

bombeo reducen el flujo de los ríos, lo que puede llegar hasta a extinguirlos. En ese escenario, los niveles de agua subterránea descenderían considerablemente, afectando así los pozos someros y eventualmente los pozos profundos. La mezcla del flujo profundo y el somero puede darse con la fluctuación de los niveles del agua subterránea. Dado la contaminación por actividades agrícolas del flujo somero, la calidad del agua de pozos profundos se verá afectada.

Se estableció que las simulaciones en estado no estacionario son fundamentales para determinar los períodos de mayor estrés para el acuífero. Este enfoque es de particular importancia para la evaluación del agua subterránea como fuente para irrigación a gran escala en León y Chinandega. Este es un tema que ha sido investigado anteriormente pero sin considerar las implicaciones del aumento en la extracción. En este trabajo se encontró que el incremento en el bombeo afecta negativamente los cuerpos de agua superficiales. Los enfoques usados anteriormente sólo consideran la respuesta del acuífero en estado estacionario, lo que no proporciona suficientes detalles sobre el comportamiento del sistema.

El manejo del agua subterránea en el acuífero León-Chinandega tiene que considerar las consecuencias de la extracción en el agua superficial. Se encontró que el tiempo de respuesta del acuífero es de un año hidrológico, lo cual hace posible desarrollar estrategias de manejo con resultados a corto plazo. Las simulaciones producidas por el modelo aquí desarrollado pueden ayudar a establecer el balance entre el

aprovechamiento del recurso y niveles razonable de impacto en los ríos. Esta es una poderosa herramienta que puede ser usada por los planificadores para la toma de decisiones.

El trabajo futuro debe enfocar la recolección de datos en la medición periódica del flujo y niveles en los ríos, al menos mediciones mensuales por un período no menor a un año hidrológico. Estos datos ayudarán a reducir el rango de estimados de recarga lo que mejorará más la precisión de las simulaciones. Datos de precipitación también son necesarios para mejorar los estimados de recarga. Debe establecerse una red de pozos de monitoreo para registrar las fluctuaciones en los niveles freáticos.

El modelo numérico regional desarrollado aquí puede ser usado para construir un modelo a menor escala que estudie los problemas de contaminación en el área. El transporte de contaminantes puede estudiarse definiendo un área menor dentro del modelo regional para construir un modelo mas refinado que pueda incluir mayores detalles. Los resultados del modelo regional serán usados para definir los límites de este nuevo modelo y la discretización espacial será refinada para investigar la contaminación en el acuífero. Con un modelo a menor escala será posible definir áreas de protección para pozos de suministro de agua potable. Al tener una menor escala puede proporcionar mayor detalle en cuanto el flujo de agua subterránea hacia pozos y la división del sistema de flujo regional y el local.

### **Bibliografía**

Anderson M. P. and Woessner W. W., 1992. Applied groundwater modeling:

simulation of flow and advective transport. Academic Press. San Diego California.

Briemberg, J., 1994. An investigation of pesticide contamination of groundwater sources for urban water distribution systems in the Pacific Region of Nicaragua. Final Report 3. CIDA Awards for Canadians.

Centro Humboldt, 2001. Caracterización hidrogeológica, hidroquímica, bacteriológica y de plaguicidas en las aguas subterráneas del municipio de Posoltega. Managua, Nicaragua.

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA-UNAN), 1999a. Diagnóstico de la calidad toxicológica de las aguas y suelos y calidad bacteriológica de las aguas del municipio de Posoltega. Managua, Nicaragua.

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos (CIRA-UNAN), 1999b. Proyecto ARCAL XXXI. Caracterización de los acuíferos para la gestión sustentable de los recursos hídricos subterráneos en áreas urbanas. Informe Nicaragua. Estudio isotópico y de la contaminación del acuífero León-Chinandega. Managua, Nicaragua.

Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall. Englewood Cliff, New Jersey.

INETER, 2000. Estudios hidrológicos e hidrogeológicos en la región del Pacífico de Nicaragua. Fase I Región Chinandega-León-Nagarote. Elaborado para MAGFOR. Vol. I, II and III. Managua, Nicaragua.

Naciones Unidas, 1974. Investigaciones de aguas subterráneas en la región de la Costa del Pacífico. Zona de Chinandega. Vol. I and II. New York.

U.S. Geological Survey, 1997. MODFLOW Fact sheet FS-121-97. United States Geological Survey.