

EVALUACIÓN DE UN ACUÍFERO Y SUS RESERVAS CON FINES DE EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA. (CASO: PORCIÓN DEL ACUÍFERO UBICADO EN LA FINCA “EL PUERTO” EN SANTA CRUZ DEL ZULIA-VENEZUELA)

Evaluation of an aquifer and its reserves for agricultural use

Igle Umbría Núñez* y Hervé Jégat **

* Profesora de la Universidad de los Andes.
Núcleo Universitario Rafael Rangel.

Departamento de Ingeniería NURR-ULA-Trujillo-Venezuela
e-mail: igleumbria@gmail.com,

** Profesor del Centro Interamericano de
Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial
CIDIAT-ULA-Mérida, Venezuela
e-mail: [hjgat@cidiat.ing.ula.ve](mailto:hjegat@cidiat.ing.ula.ve)

Autor Principal: Igle Umbría Núñez

Recibido: 26/06/08
Aprobado: 06/06/09

Resumen

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar las disponibilidades del recurso de agua subterránea en un acuífero ubicado en la Finca “El Puerto” en Santa Cruz del Zulia-Venezuela, a fin de establecer políticas de explotación con fines agrícolas. El estudio proporciona una estimación de la recarga del acuífero, su comportamiento y la respuesta de éste ante las acciones propuestas. Se recopiló, procesó y analizó la información disponible recolectada, trabajándose a régimen no permanente con el acuífero libre mediante la propuesta de instalación de dos pozos de extracción de agua. Se simuló a través del modelo WINFLOW, cinco políticas de explotación aplicadas al acuífero. Se preparó para un período de tiempo de 20 años, diferentes datos de descarga, considerando extracciones de agua que van desde lo necesario para cumplir solamente con la demanda evapotranspiratoria de los cultivos, hasta descargas que consideran otros usos adicionales. En las simulaciones se consideró tanto la recarga del acuífero por parte de la precipitación como la recarga debido a la presencia de un río en el área. Se pudo comprobar que no es recomendable extraer agua de los pozos cuándo el caudal extraído supera los 50 m³/día, ya que los abatimientos son excesivos, siendo las recomendables entre los 20 y los 50 m³/día.

Palabras claves: Evaluación, Acuífero, Políticas de Explotación, Simulación, Evapotranspiración.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the availability of ground water in order to establish a series of policies of exploitation for agricultural use. An examination of the characteristics of the aquifer and its response to different strategies of management is provided. The available information about the study area was

gathered and analyzed, considering a non-steady-state regime. The modeling of the aquifer considered the presence of two pumping wells. Five strategies of the unconfined aquifer exploitation were simulated using the model “WINFLOW”. Several scenarios of exploitation of the aquifer were simulated considering a period of time of 20 years, and different values of extraction. The values of extracted water ranged from those needed to satisfy the evapotranspiration demand of the crops in the area to those that involve additional uses. With regard to the recharge of the aquifer, the contributions from both precipitation and a river were considered. The model simulated that discharges over 50 m³/d will produce excessive drawdown. The strategies recommended were to consider pumping rates ranging from 20 to 50 m³/d to assure a sustainable use of the aquifer.

Key words: Evaluation, Aquifer, Policies of Exploitation, Simulation, Evapotranspiration

Agradecimiento: Los autores agradecen al Concejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de los Andes por el financiamiento aprobado a la presente investigación, como proyecto (Código NURR-C-266-99-01-C).

Introducción

Un estudio donde se evalúe las reservas de un acuífero ubicado en La Finca “El Puerto” en Santa Cruz del Zulia-Venezuela, constituye el aspecto central para determinar y cuantificar el nivel de explotación del mismo, con fines de cubrir los requerimientos de agua de esta zona agrícola.

En la zona escogida para el estudio, existen épocas bien definidas del año para las cuales la demanda hídrica de los cultivos supera considerablemente los aportes de la precipitación, hecho que repercute negativamente en la producción, tal como resultó de la curva de duración de caudales en la zona de estudio, la cual permitió determinar que en el 85% del año, este río conduce un caudal igual o mayor a 15 m³/s, siendo recomendado para el riego entre un 75%-85% de la probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el hecho de que exista una variedad importante de

cultivos implementados, ya que la demanda puede llegar a aumentar significativamente. Para enfrentar el mencionado problema, se ha planteado la posibilidad de aprovechar los aportes del agua subterránea, mediante una política de explotación racional de una porción del acuífero, considerada como representativa.

En los últimos tiempos se han hecho grandes progresos en el campo del análisis matemático y técnicas de simulación sobre problemas del flujo de agua en el suelo. Aplicando estos métodos matemáticos y modelos apropiados, se pueden ahora resolver una serie de problemas relacionados con el desarrollo de las aguas subterráneas (Samper et al, 1990). Sin embargo, el que los resultados obtenidos por estos métodos sean dignos de confianza, depende mayormente de la exactitud de los valores numéricos que se asignen a las características hidráulicas de los

acuíferos y de los estratos pocos permeables así como también de las condiciones de frontera.

Las políticas públicas orientadas a coordinar acciones para el desarrollo del hombre utilizando el ámbito de un acuífero como base de gestión han tenido diferentes enfoques, y una desigual evolución en los países de América Latina y el Caribe. Sin embargo, el tema ha recobrado vigencia desde 1990, en el momento en que los países de la región se han abocado seriamente al tema de alcanzar un desarrollo sustentable conciliando crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental.

La cuenca hidrográfica, y en especial el agua, juega un rol muy importante para permitir la participación e integración de los actores involucrados en el desarrollo y metas por alcanzar. Esta participación permite conjugar tanto niveles regionales como niveles locales y además pone en evidencia, con relación a casos concretos, los dilemas por resolver sobre privatización de recursos naturales, el rol del estado y del sector público y el rol del nivel local y regional en la gestión de recursos naturales que, como el agua, son considerados usualmente como patrimonio de un país. Dentro de este contexto, el presente trabajo pretende aportar elementos para definir políticas de explotación coherentes para alcanzar metas de desarrollo acorde con las necesidades de la zona "El Puerto" en Santa Cruz del Zulia de la República Bolivariana de Venezuela.

Hoy en día todas las ciencias con las que el hombre trata de desarrollar, facilitar y mejorar su medio de vida y en especial las ciencias hídricas se basan en la obtención de una gran cantidad de información (datos) para

que la implementación de estas técnicas posea validez científica. Uno de los procedimientos más empleados en la actualidad es la presentación de información de manera gráfica, ya que esta nos aporta una idea clara, precisa y rápida de la variación de uno o varios parámetros en estudio con respecto al tiempo y al espacio.

Por las razones antes descritas se hace necesario, aun cuando se haga uso del agua superficial, un mejor conocimiento de las disponibilidades y caracterización del agua tanto subterránea como superficial, a fin de implementar las medidas necesarias para un uso racional del recurso, acorde con las necesidades de la región y el manejo más adecuado del mismo.

MARCO TEÓRICO

Acuíferos.

En la hidrogeología subterránea, se denomina acuífero a aquella estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir sus necesidades.

Si se analiza detenidamente esta definición, (del latín aqua = agua y fero = llevar), se aprecia que el agua encerrada en una formación geológica cualquiera (gravas de un río, calizas muy agrietadas, areniscas porosas) puede estar ocupando ya sea los poros o vacíos intergranulares que presenta la misma, ya sean las fracturas, diaclasas o grietas que también pueden darse. En este sentido algunos autores especialmente franceses, emplean las denominaciones de acuíferos por porosidad y acuíferos por fracturación

o fisuración para cada uno de los casos anteriores. El movimiento del agua a través de éstos no se realiza necesariamente en forma idéntica en toda la extensión, ya que ello depende de las propiedades y características del acuífero. Como ejemplos del término anterior se pueden citar los aluviones de los ríos, formados por una mezcla de gravas y arenas, las areniscas poco cementadas, algunos tipos de rocas volcánicas, formaciones calcáreas muy karstificadas, y otras. (Custodio et al, 1.976).

Arocha (1.980), clasifica los tipos de acuíferos de la siguiente manera:

Libres: son aquellas formaciones en las cuales el nivel de agua coincide con el nivel superior de la formación geológica que lo contiene, es decir, la presión del acuífero es la presión atmosférica. En relación con su formación, los acuíferos libres se originan en terrenos permeables que pueden ser alimentados directamente de la lluvia o de los ríos, lagos, entre otros; con los cuales se encuentra en comunicación.

Confinados: llamados también artesianos, en los cuales el agua está confinada entre dos estratos impermeables y sometida a presiones mayores que la presión atmosférica.

Semiconfinados: cubre el rango de valores entre acuíferos libres y confinados, consiste en un estrato completamente saturado, sobre el cual existe un estrato semi – impermeable definido por baja permeabilidad. La extracción de agua de éstos provoca un movimiento vertical del agua contenida en el estrato superior semi – impermeable.

En términos generales, el agua subterránea circula en forma de una corriente caótica con velocidad variable en función de la

permeabilidad y la pendiente, entre otros. El movimiento del agua es laminar en los depósitos granulares y turbulento en los fisurados. Este movimiento sigue la línea de máxima pendiente. En los acuíferos libres va de los puntos más altos a los más bajos.

Características de los acuíferos

La propiedad de los acuíferos de contener y conducir agua está gobernada por varios factores: porosidad, permeabilidad, transmisibilidad, producción específica y coeficiente de almacenamiento. Conocer estas características permite evaluar la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro a agotarlo (Arocha, 1.980).

Porosidad “n”: Debido a que las rocas no son completamente sólidas (poseen grietas o espacios intergranulares), al conjunto de estas aberturas o intersticios se llama porosidad. La porosidad no define la existencia del acuífero, ya que se precisa, además la interconexión de los intersticios. Esta característica se ve afectada por los siguientes factores: grado de compactación del material, forma y arreglo de las partículas y la gradación de las partículas, pero es independiente del tamaño de las mismas. El valor de **n** varía de 0 a 50%, dependiendo de los factores mencionados (Arocha, 1.980).

Permeabilidad “K”: Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua, es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula. Esta libertad de movimiento depende de: tamaño y formas de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. El coeficiente de permeabilidad de un material, se define como el volumen de agua que pasa en la unidad de

tiempo, a través de una sección de un acuífero de área unitaria (1m^2), cuando el gradiente hidráulico es unitario y, en condiciones de temperatura de 60°F (15°C). La permeabilidad tiene dimensiones de velocidad $\text{m}/\text{día}$ ó $\text{m}^3/\text{día}/\text{m}^2$ (Arocha, 1.980).

Transmisibilidad “T”: Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, y se define; como el volumen de agua que pasa en la unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 60°F (15°C) (Arocha, 1.980).

Retención específica “Rs”: Al llenar un recipiente con material poroso completamente seco y luego añadir agua hasta saturarlo, no es posible recuperar toda el agua añadida por medio de drenaje, ya que parte de esta se queda adherida al material granular por atracción molecular y tensión superficial. El volumen de agua retenido, dividido por el volumen total del material poroso, expresado en porcentaje, se llama “Retención Específica” (Arocha, 1.980).

Coefficiente de almacenamiento de un acuífero “S”: Se define como el volumen de agua (m^3), que drena por un área unitaria de 1m^2 , cuando la presión hidrostática desciende una unidad de presión (1 metro). En acuíferos libres una disminución de un metro de presión equivale a un descenso unitario de la columna de agua; por lo tanto, el coeficiente de almacenamiento y la producción específica son iguales. Mientras que en los “acuíferos confinados”, una disminución de la presión hidrostática se traduce en un aumento de presión de los estratos superiores sobre el acuífero, lo que implica, expansión del agua en pequeña cantidad y contracción del acuífero por el peso de los estratos superiores. El cambio de volumen es pequeño, por lo tanto los coeficientes de almacenamiento son relativamente bajos (Arocha, 1.980).

Evaluación de acuíferos mediante métodos geoestadísticos.

(Matheron, 1.962), considerado el padre de la geoestadística en su forma actual, desarrolla las bases conceptuales de la teoría de las

variables regionalizadas. Sin embargo, las aplicaciones iniciales de la metodología de estimación fueron hechas en 1.951 por Krige, geólogo y estadístico sudafricano, para la evaluación de minas de plata y algunas de las grandes minas de oro sudafricanas. En honor a Krige, los geomatemáticos franceses han popularizado este tipo de estimación bajo el nombre de *kriging* o *krigeado* en español (Mora, 1.996).

(Davis, 1.972), plantea que el método es poco conocido por los geólogos de Norte América, puesto que a la fecha se había publicado poca literatura en inglés sobre los nuevos conceptos de la teoría de variables regionalizadas. Aunque los postulados originales de esta teoría fueron aplicados, en principio, para la evaluación y estimación de reservas mineras, los conceptos de esta teoría se adaptan particularmente a los problemas encontrados en ciencias hídricas, permitiendo evidenciar la relación existente entre la variabilidad espacial de fenómenos hidroclimáticos e hidrogeológicos y la precisión en el conocimiento de éstos fenómenos. (Delhomme, 1.978) aplica estos postulados en la realización de cartografía automatizada, la obtención de datos básicos para modelos

matemáticos, la estimación de precipitaciones medias en cuencas hídricas y la optimización de redes de medición.

METODOLOGÍA

Análisis de la información básica.

La determinación de los parámetros hidrogeológicos del acuífero que cuenta con la prueba de bombeo, se hizo usando el programa GWW. Con su uso se puede conocer directamente las características de éste, ya que el mismo aplica a los datos las diferentes metodologías con el fin de que se consiga la curva que mejor se ajuste. En este caso en particular, los datos de la prueba de bombeo se ajustan perfectamente con la curva de (Theis, 1935).

La Conductividad Hidráulica tal como se describió anteriormente, forma parte de las constantes básicas del suelo a ser determinada de acuerdo a los fines de la presente investigación. Dicho parámetro es una manera de tener una idea cuantitativa sobre la mayor o menor facilidad con que se puede mover el agua en un suelo dado, en condiciones de saturación. En el trabajo presentado por (Laguna et al 1995), se pueden observar los resultados obtenidos en cuanto a este parámetro, según sondeos realizados a nivel sub-superficial del suelo.

En vista de la situación presentada, en el presente estudio, se trabajará con los valores medios de conductividad hidráulica aportados por el trabajo mencionado, el cual es de 0,696 m/día, con un rendimiento específico de 0,062, ya que el comportamiento de los niveles freáticos durante los años de registro, incluso en algunas épocas del año donde se presentaron fuertes precipitaciones, superaron el nivel del

terreno, evidenciando la presencia de un acuífero libre para el que se tomará una profundidad de 20m y un tope de 0m.

La curva de duración de caudales en la zona de estudio, permitió determinar que en el 85% del año, este río conduce un caudal igual o mayor a 15 m³/s, siendo recomendado para el riego entre un 75%-85% de la probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el hecho de que exista una variedad importante de cultivos implementados, ya que la demanda puede llegar a aumentar significativamente. Si se explota el recurso de agua proveniente del acuífero, los usos de ésta pueden ser múltiples. Además, en la curva de duración de caudales, se puede observar que el mínimo caudal que el río conduce es de 10 m³/s en el 100% del año, por lo que si se toma un 5% de éste caudal como efluente o caudal de recarga al acuífero, este valor sería de 0,5 m³/s, o sea 43200 m³/día.

El balance hídrico del suelo en equilibrio con el clima, es una forma de cuantificar la situación hídrica de un área determinada para un intervalo de tiempo dado. Se realiza con fines de planificación agrícola e hidráulica nacional, regional o zonal; o bien con fines de planificación, diseño y funcionamiento de un sistema de riego.

Una vez estimadas la capacidad de almacenamiento del suelo, d_t , evapotranspiración real del cultivo, E_t , y precipitación efectiva, P_e , se procede a realizar el balance hídrico en cada una de las unidades de suelo, obteniéndose como resultado los caudales requeridos para cada una de las unidades de suelo, caudal de demanda de riego y caudal mínimo del río.

La metodología aplicada en el presente trabajo parte del procesamiento de los datos de niveles freáticos, medidos mensualmente durante un período de cinco años en la Finca El Puerto en Santa Cruz del Zulia, cuya ubicación se presenta en la Figura 1.

Elaboración de archivos

Se creó un archivo de datos XYZ, para ser trabajado con el programa SURFER.

Caracterización geoestadística de los parámetros del acuífero.

Según (Samper et al, 1990), la caracterización geoestadística o análisis estructural implica:

- Estudio conceptual del fenómeno.
- Estudio de los datos, distribución de la variable y preparación de los datos.
- Cálculo del variograma muestral.
- Estimación del variograma.

Aplicación de un modelo matemático

Este modelo debe permitir calcular el comportamiento del acuífero y la variación de los niveles, bajo un flujo en régimen no permanente.

Realización de simulaciones

Se realizaron una serie de simulaciones, en las que, a partir del mapa base, se trabajó con diferentes valores de conductividad hidráulica de tiempo.

Recopilación y análisis de la información existente.

Prueba de Hipótesis de Normalidad.

Previo a todo avance es importante verificar la homogeneidad de los datos con los que se desea trabajar. La prueba de distribución normal se utiliza de forma amplia por ser una de las distribuciones probabilísticas que mejor adaptación posee en la evaluación de los fenómenos aleatorios. Además, muchos de los parámetros hidrogeológicos parecen seguir una distribución logarítmica normal, dicha transformación la convierte en una distribución normal. Una de las técnicas usadas con más frecuencia en una investigación para buscar una relación entre dos o más variables ligadas de un modo causal es el análisis de regresión. El criterio asumido de aceptación o rechazo de la prueba es el correspondiente a un nivel de significación igual a 0.05. De los resultados de la prueba de normalidad para los niveles freáticos medios mensuales de cinco años de registro, se determina que la variable sigue una distribución normal, tal como se observa en la Figura 2.

La mayoría de los métodos de simulación presuponen, de forma más o menos explícita, que la variable a simular sigue una distribución normal. Esta hipótesis se refiere a la distribución conjunta de dichos valores en varios puntos.

Con el fin de realizar el análisis de sensibilidad del modelo escogido y trabajar en la simulación, para establecer las políticas de explotación, se realizaron varias corridas del WINFLOW a partir del mapa base de niveles iniciales. El modelo se trabajó en régimen no permanente, para lo cual es de suma importancia incluir los valores de los parámetros tales como: Coeficiente de almacenamiento,

descarga y el tiempo computado para obtener una solución (Tabla 1).

El modelo se puede trabajar en régimen permanente o en régimen no permanente según el caso a tratar, inclusive es de mucha utilidad en un acuífero en producción que presente problemas de contaminación. Técnicas de seguimiento de partículas son implementadas numéricamente por este para calcular tiempo de viaje y tiempo de flujo.

Tal como se dijo anteriormente las políticas de explotación aplicadas al acuífero del presente trabajo, implican una variación en el tiempo, puesto que es necesario definirlo, si se pretende extraer agua del acuífero y saber como afecta en éste las reservas.

Para el análisis se tomaron datos de 65 piezómetros instalados a profundidades que están entre los 3m y 5m.

Evaluación del funcionamiento del acuífero. La evaluación del funcionamiento del acuífero permite el conocimiento de la superficie piezométrica, de la dirección del flujo y de la recarga natural tomando en cuenta las características hidrogeológicas del mismo. Tal como se aprecia en la Figura 3.

Reservas del acuífero. Basándose en los resultados aportados por las pruebas de niveles freáticos hechos en la zona de estudio durante más de cinco años, se determinó que la mayor parte del año el nivel freático se encuentra a una profundidad máxima de 2 metros y que la porosidad es de 20%; por lo que calculando las reservas con base a una profundidad de 5 metros desde el nivel del terreno, la profundidad saturada será de 3 metros, que fue la

mayor establecida por los pozos de observación, y una profundidad asumida para los cálculos de 20 metros con una profundidad saturada de 18 metros; el volumen de agua en reserva del acuífero por año sería:

- 5.923.900,00 m² de superficie por 3 m de profundidad saturada, significa un total de 17.771.700,00 m³, de los cuales un 20% que es la porosidad, es la reserva de agua, o sea, 3.554.340,00 m³.
- 5.923.900,00 m² de superficie por 18 m de profundidad saturada, significa un total de 106.630.200,00 m³, de los cuales un 20% que es la porosidad, es la reserva de agua, o sea, 21.326.040,00 m³.

Las políticas de explotación aplicadas al acuífero del presente trabajo, implican una variación en el tiempo, en el caso de pretender extraer agua del mismo y conocer cómo afecta en éste las reservas. El resultado de trabajar los datos en régimen no permanente, muestra un comportamiento bastante uniforme del acuífero, en los casos en que la conductividad hidráulica está clasificada como moderada, tomando en cuenta que no se está asumiendo ni recarga ni descarga en él; cuando el caso es el de una conductividad hidráulica lenta, sencillamente no hay movimiento de agua en el perfil y por último en donde se consideran valores de conductividad hidráulica entre moderadamente alta y alta, se puede apreciar que las curvas de abatimiento son muy pequeñas, en comparación con las anteriormente mencionadas.

Aparte y en lo que se refiere a la forma en que el modelo arroja resultados, los presenta en forma gráfica, pudiéndose observar sobre un mapa de niveles freáticos iniciales, el

comportamiento del mismo. El análisis de sensibilidad hecho al modelo, refleja que si el acuífero fuera uno solo, homogéneo-libre y cuyo fondo se asume, con valores de conductividad hidráulica lenta, los niveles de agua en el pozo estarían por debajo de la base del acuífero, tal como se observa en las diferentes corridas en el modelo WINFLOW, en la Figura 4.

Analizando los resultados obtenidos en las corridas a partir de la aplicación del modelo WinFlow, según los valores dados a los parámetros de éstas, es notorio que la implementación de extracciones al acuífero libre que se encuentra ubicado entre la capa confinante y el nivel del terreno a través de dos pozos, muestran que se producen abatimientos hacia los mismos, que van disminuyendo en profundidad de acuerdo se baje el caudal de extracción que se estime para cada una de las demandas. Tal como se observó en las diferentes alternativas o políticas de explotación planteadas, el dato de recarga del acuífero libre es la sumatoria del aporte por precipitación efectiva y por caudal del río, aunque éste valor es lo suficientemente alto solo en el caso de extracciones de agua de 50 m³/d y de 20 m³/d, se justifica establecer medidas de explotación para 20 años, puesto que no se evidencia un agotamiento importante de las reservas del acuífero; tal como se evidencia en la Figura 5, referente a dichas alternativas.

Resultados y discusión

1) Analizando los resultados de los planos de niveles freáticos generados por el SURFER, se deduce que la dirección general del flujo coincide con la topografía del terreno, es decir, desde las partes altas

hasta las más bajas. Se observa claramente que la dirección del flujo es hacia el Noroeste, principalmente en la zona comprendida entre la parte media de la finca y la zona oeste. Esta dirección converge hacia el cauce del Río Escalante, lo cual hace presumir que este funciona no solo como afluente, sino también como efluente o zona de descarga para los excesos de agua (drenaje) que se generan en la zona en épocas de fuertes lluvias.

- 2) De los resultados de la prueba de normalidad para las derivas + residuales medios mensuales de cinco años de registro (1994-1999), se determinó que la variable sigue una distribución normal, ya que los valores de niveles freáticos tomados siguen o mantienen una tendencia lineal, con una media y una desviación estándar 8.264 y 0.716 respectivamente. La medida de dispersión de los datos con respecto a su media o varianza es mínima, con un valor de 0.513.
- 3) Mediante el análisis hecho a los niveles freáticos medios mensuales 1994-1999, 09 de marzo de 1994 y 09 de marzo de 1999, para obtener el gradiente hidráulico, se distinguen valores de éstos desde 6 ‰ hasta valores mayores de 7 ‰. En general, los gradientes hidráulicos tienden a aumentar en períodos húmedos y disminuir en períodos secos, además de que se observa una subida en los gradientes conforme suben los niveles freáticos.
- 4) Se puede observar, según los datos recogidos y trabajados

para los archivos, que los niveles freáticos más profundos se registran en los meses de agosto a octubre, las mayores variaciones se presentan en los meses de noviembre a diciembre y mayo a junio, coincidiendo con los picos de precipitación y cota en el nivel del río Escalante, con una tendencia generalizada hacia niveles freáticos cada vez más superficiales. La cota del río es inferior a la cota de los pozos en las épocas de menores lluvias y supera las cotas de algunos pozos en la época de mayores lluvias, lo cual hace pensar que el cauce del río Escalante, actúa como efluente en las épocas de sequía y como afluente en las épocas donde ocurren las mayores precipitaciones del año. Por lo tanto, se puede decir que las variaciones estacionales de la napa freática están influenciadas por períodos de mayor y/o menor precipitación y por la ocurrencia de lapsos de mayor y/o menor cota en el nivel del río Escalante.

- 5) El mapa de tendencia de los niveles freáticos generado a partir de los datos del acuífero libre, el cual se encuentra sobre una capa impermeable asumida a los 20 metros de profundidad y en la que no se tomó en cuenta la recarga ni pérdida de flujo, muestra una pequeña diferenciación en la variación del nivel freático.
- 6) Obteniéndose el comportamiento del acuífero a través de un análisis de sensibilidad, mediante el cual se cambian los parámetros del tiempo y de la conductividad

hidráulica, y se adopta en base a la porosidad del perfil del suelo y de su textura, el coeficiente de almacenamiento del acuífero libre en $6,2e-002$, fondo y tope del acuífero a -20 m y 0m respectivamente y nivel de referencia a los -7,5 m. Se observa, basándose en los datos, que los resultados gráficos de trabajar con estos parámetros en el modelo, poseen una tendencia uniforme en todos los casos, excepto en el que se asumió una conductividad hidráulica muy baja.

- 7) Se puede tomar la alternativa de aprovechar el ascenso de agua por capilaridad desde el nivel freático, para implementar el riego por subirrigación, en el caso de la Palma Africana, en las condiciones de suelo y clima planteados, un nivel freático menor a 1,40 m en las unidades de suelo I y II, y menor a 1,20 m en la unidad III, reduciría la producción por restricción radicular. Por otro lado, si el nivel freático se mantiene por debajo de los 2,00 m de profundidad en las unidades I y II, y por debajo de 1,80 m en la unidad III, reduciría la producción durante la temporada “seca” por limitarse la captación de agua a través de las raíces. Esta es una alternativa que no se modela, pero que se puede tener como opción mientras se implementan las otras propuestas que involucran la construcción de los pozos y su posterior explotación.
- 8) Analizando los resultados obtenidos en las corridas a partir de la aplicación del modelo WinFlow, según los

valores dados a los parámetros de éstas, es notorio que la implementación de extracciones al acuífero libre que se encuentra ubicado entre la capa confinante y el nivel del terreno a través de dos pozos, muestran que se producen abatimientos hacia los mismos, que van disminuyendo en profundidad de acuerdo se baje el caudal de extracción que se estime para cada una de las cinco políticas de demanda.

9) Tal como se muestra en las diferentes alternativas o políticas de explotación planteadas, el dato de recarga del acuífero libre es la sumatoria del aporte por precipitación efectiva y por caudal del río, aunque éste valor es lo suficientemente alto. Solamente en el caso de extracciones de agua de 50 m³/d y de 20 m³/d, se justifica establecer medidas de explotación para 20 años, puesto que no se evidencia un agotamiento importante de las reservas del acuífero; en el entendido que el nivel de referencia de agua bajo las cinco situaciones, solamente se mantiene cerca de las alternativas 4 y 5.

10) Las alternativas de explotación 1, 2 y 3 presentan un comportamiento similar, en el que el modelo “corre”, advirtiendo grandes abatimientos. De esto se puede interpretar, que se podría prescindir de aplicar las mencionadas políticas de explotación al acuífero libre a través de pozos de explotación, más bien se recomendaría aprovechar la red de canales de drenaje

existente con el doble propósito de regar por subirrigación, aumentando o haciendo subir el nivel freático en épocas de sequía, bombeando agua hacia los mismos.

11) Es necesario destacar que las inferencias hechas aquí, están basadas en hipótesis realizadas para utilizar el modelo en el acuífero, ya que es bien sabido que todo modelo es una simplificación de la realidad, y que está tratando siempre de ajustarse en lo posible a la misma, para representarlo no de una manera exacta, pero sí aproximada.

12) Otra suposición consistió en fijar la base impermeable del acuífero en la cota -20m (veinte negativo)m debido a que el acuífero presenta características homogéneas. (Boonstra et al 1981) recomiendan fijar una base impermeable ficticia a una profundidad que se juzgue razonable.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En épocas de lluvias, es la precipitación la principal fuente de recarga del acuífero, mientras que en épocas de sequía, el río Escalante es el que actúa como fuente de recarga. No se encontraron indicios que evidencien peligros de salinización, sodificación o inclusión de elementos que disminuyan la fertilidad del suelo, al ser usadas las aguas de esta fuente, en la irrigación. El nivel del río es inferior al nivel de agua de los pozos en las épocas de menores lluvias y supera los niveles de algunos pozos en la época de mayores lluvias, lo cual hace pensar que el cauce del

río Escalante actúa como efluente en las épocas de sequía y como afluente en las épocas donde ocurren las mayores precipitaciones del año.

Los niveles freáticos en la zona en estudio varían entre 2,0 y 4,0 metros; pudiéndose ubicar la mayor parte de éstos entre 2,0 y 3,0 metros, y la dirección predominante del flujo es Noroeste, coincidiendo con la dirección de la pendiente del terreno, que converge hacia el cauce del río Escalante. Los niveles freáticos más profundos se registran en los meses de agosto a octubre, y las mayores variaciones se presentan en los meses de noviembre a diciembre y mayo a junio, coincidiendo con los picos de precipitación y cota en el nivel del río Escalante, con una tendencia generalizada hacia niveles freáticos cada vez más superficiales.

Mediante el uso del programa GWW se conocieron los valores que caracterizan el acuífero al cual se le realizó la prueba de bombeo, obteniéndose los valores de transmisividad en $284 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$, y un coeficiente de almacenamiento de $2,93\text{e}-006$ que indica claramente que el acuífero en cuestión es un “acuífero confinado”. Este resultado no coincide con los valores y el comportamiento del estrato sub-superficial del suelo en el que se tomaron los ensayos de conductividad hidráulica y profundidades de niveles freáticos, los cuales, inclusive en algunas épocas del año, superan el nivel del terreno, comportándose como un acuífero libre, del cual no se conoce hasta ahora su límite inferior y que se encuentra dividido del acuífero confinado a través de una capa confinante.

El resultado de la conductividad hidráulica de la formación acuífera libre se obtuvo de los ensayos

realizados por (Laguna et al, 1995), hasta una profundidad de 5 m, hallándose una conductividad hidráulica media de toda la superficie en estudio de $0,696 \text{ m}/\text{día}$. Con éste valor de conductividad hidráulica clasificada como moderada se trabajó el modelo de simulación, y sobre esta base y la clasificación textural del suelo, se asumió un valor de rendimiento específico de $0,062$.

Gran parte del año el cultivo se encuentra bajo condiciones de déficit hídrico, siendo los meses más críticos, enero, febrero y marzo, seguidos de junio, julio, agosto y septiembre. Los niveles freáticos ubicados entre los $1,40\text{m}$ y $2,00\text{m}$ de profundidad permitirían satisfacer los requisitos de aireación, enraizamiento y de evapotranspiración de la Palma Africana, en las condiciones de suelo y clima de la zona, si el caso fuera el de aprovechar los ascensos capilares desde las profundidades del nivel freático planteado, para el riego por sub-irrigación.

Los resultados de la prueba de normalidad para los niveles freáticos determinaron que la variable sigue una distribución normal, ya que los valores de niveles freáticos tomados siguen o mantienen una tendencia lineal, con una media y una desviación estándar de 8.264m y 0.716m respectivamente. La medida de dispersión de los datos con respecto a su media o varianza es mínima, con un valor de 0.513m .

En el análisis estructural de los parámetros hidrogeológicos, la cantidad y calidad de la información disponible es de suma importancia debido a su influencia en la selección del variograma muestral. La estimación del variograma se hizo basándose exclusivamente en las medidas de la variable estudiada. El

número de medidas necesarias para que la estimación sea fiable debe ser alto, ya que de lo contrario se puede llegar a interpretaciones erróneas de la realidad del fenómeno. El flujo del agua subterránea impone una marcada “tendencia”, por lo que los niveles no suelen ser funciones estacionarias. Debido a esto, en el presente estudio se trabajó con residuos, lo cual consiste en la diferencia entre la tendencia y los valores medidos. En este caso los residuos son estacionarios, y su variograma alcanzó una meseta.

Los valores de gradiente hidráulico varían de 0‰ hasta valores mayores de 7‰, siendo más frecuentes los comprendidos entre 4‰ y 7‰. En general, los gradientes hidráulicos tienden a aumentar en períodos húmedos y disminuir en períodos secos, además de que se observa una subida en los gradientes conforme suben los niveles freáticos.

Aun con todas las limitaciones y restricciones que le son propias a los modelos de simulación, su uso queda plenamente justificado cuando se trata de predecir el impacto de la interferencia del hombre al disponer de los recursos del agua subterránea.

El modelo WinFlow, en este caso, ha demostrado ser una herramienta útil para simular el comportamiento y las respuestas del acuífero ante determinadas acciones exteriores, ya que está diseñado como un modelo analítico interactivo de simulación en dos dimensiones en condición de estado transitorio para flujo de agua subterránea, y cuyo módulo de condición de estado, simula el agua subterránea en el plano horizontal. WinFlow no predice aplicaciones en acuíferos que presentan una fuerte variación en el

gradiente vertical, a menos que sea usado en problemas donde el flujo horizontal se considera dominante.

El modelo se trabajó en régimen no permanente, por lo que el nivel de referencia o constante de estado del mismo es únicamente usado en combinación con el gradiente uniforme para calcular inicialmente el plano potenciométrico superficial. Una vez obtenido el mencionado plano, se puede trabajar sobre éste y simular diferentes situaciones, a fin de establecer el comportamiento del acuífero ante las mismas.

Las reservas estimadas del acuífero libre de la zona se basaron en dos resultados: el primero de ellos, producto de la superficie total del área de estudio y de una profundidad de 3 m de perfil saturado; el segundo, producto de la superficie total del área de estudio y de una profundidad de 18 m de perfil saturado, para una porosidad del suelo de 20%.

Para las políticas de explotación de las alternativas 4 y 5 propuestas y trabajadas con el modelo, no existe peligro de agotar significativamente las reservas del acuífero, ya que la zona estudiada cuenta con una buena recarga de agua subterránea producto del aporte por precipitación y por caudal afluente del río.

Recomendaciones

Se hace necesario aumentar la zona de estudio para incluir las fincas aledañas, mediante la instalación de pozos de observación en ellas. Esto con el fin de obtener un mejor conocimiento del comportamiento y la extensión de los acuíferos, tanto del acuífero libre como del acuífero confinado.

Para estos estudios es importante seguir contando con los registros de aforo, lectura de los niveles en los pozos de observación y el tiempo de operación del equipo o de los equipos de bombeo. Es de vital importancia poner en marcha un programa para tales efectos, ya que el mismo permitiría llevar un registro permanente de los caudales extraídos y de los regímenes de explotación.

Una de las dificultades encontradas al realizar el presente trabajo fue el hecho de contar con un solo ensayo de bombeo, y que éste perteneciera a un acuífero confinado, y no al acuífero del cual se tomaron las variaciones de los niveles freáticos. De haber existido un mayor número de datos que involucrasen pruebas de bombeo del acuífero libre, se hubiese podido obtener las constantes de formación del acuífero libre a través del análisis y evaluación de las mismas. Es recomendable que en el futuro se realicen un mayor número de ensayos de bombeo y, que éstos vayan acompañados con su respectivo piezómetro para la medición de los niveles, de esta forma, se estaría ensayando el acuífero en sí y no el pozo. Así se obtendrían resultados más reales.

Se recomienda llevar a cabo un inventario completo de todos los pozos y piezómetros ubicados en la región, ya que toda esta información permitiría, entre otras cosas, conocer el carácter litológico, el espesor y los límites del acuífero. Además de llevar a cabo una serie de estudios geológicos y geofísicos que permitan determinar con mejor precisión las bases impermeables de los acuíferos. Por otro lado, en vista de la situación presentada por la presencia de dos acuíferos separados por una capa impermeable confinante, este inventario se hace aún más

importante, pues ello definiría los valores reales de las características de cada uno de los acuíferos involucrados y su comportamiento.

Es primordial para futuros estudios, definir la profundidad a la cual se encuentra la capa confinante, por lo que se recomienda establecer perforaciones en la zona hasta lograr el esclarecimiento de este valor.

Referencias bibliográficas

AROCHA, R. S., 1.980. Abastecimiento de Agua (Teoría y Diseño). Editorial Vegas. Caracas, Venezuela. 284 págs.

BOONSTRA y N.A. de Ridder.; 1981 Numerical modelling of groundwater basins. ILRI The Netherlands. 198 p.

CUSTODIO, E. LLAMAS R.; 1976. Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España 2100 p.

DAVIS J., 1.972. Statistics and data analysis in geology. 55º págs. New York, John Wiley and Sons.

DELHOMME, J-P. 1.978. Application de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau. Orleáns. Bureau de Recherches Géologiques et Minières., BRGM. III(4): 341 - 375.

LAGUNA, P. Y MARQUINA, J.; 1995 Estudio de niveles freáticos en Palmeras "El Puerto". Distrito Colón Estado Zulia, tesis de Pregrado de Ingeniería Agrícola, ULA - NURR. 485 p.

MATHERON G., 1.962. Traité de Geoestatistique Apliquée , Tome 1 and 2, Memories du Bureau De Recherches Geologiques et Minières, Technip. París, Francia.

MORA, L.E.; 1996. Aplicación de métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros de calidad de agua en acuíferos. Tesis M.Sc. Mérida. CIDIAT. Venezuela.

SAMPER, F.K. y J. CARRERA.; 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. España.

THEIS, C. V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 16, pp. 519-524.

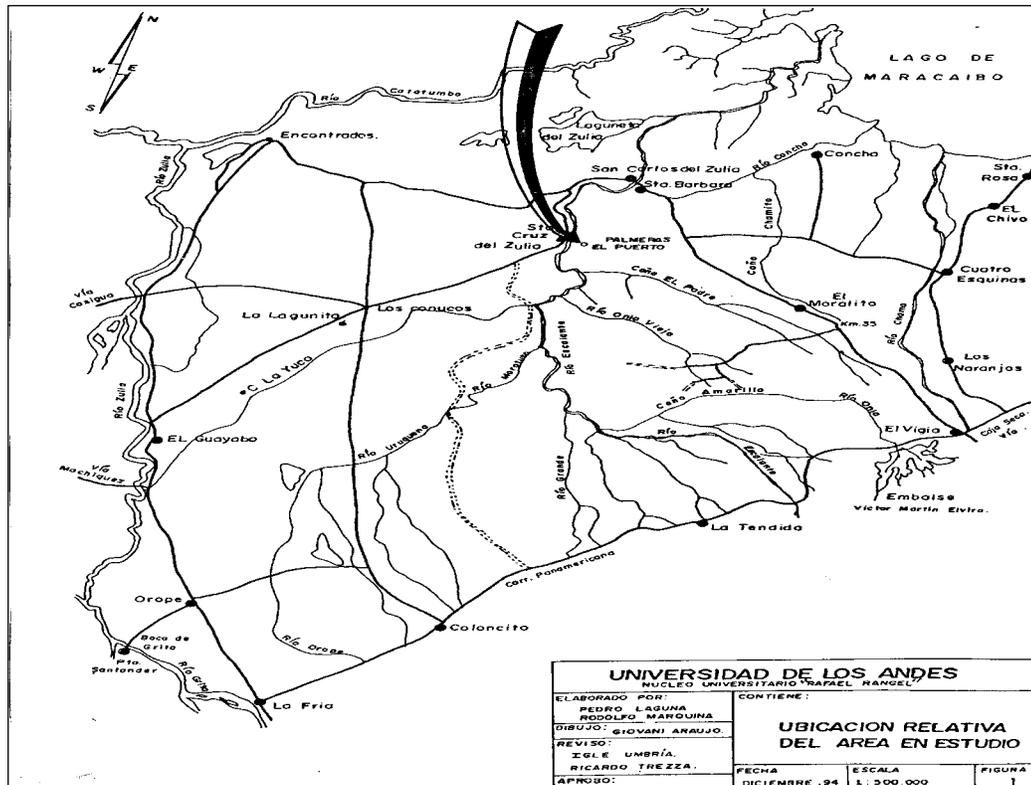


Figura 1. Ubicación de la finca El Puerto en Santa Cruz del Zulia Venezuela.

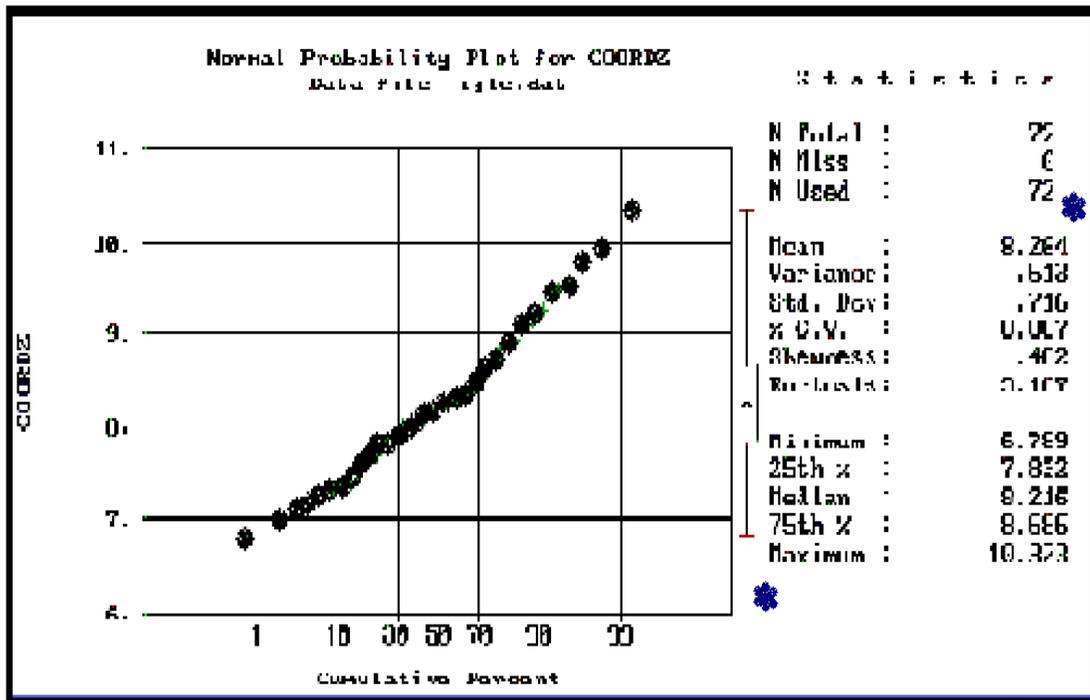


Figura 2. Distribución normal de los valores pertenecientes a los niveles

VARIABLE	NIVEL PIEZOMETRICO
Media	8.264
Varianza	0.513
Desviación estándar	0.716
Coefficiente de variabilidad %	0.007
Mínimo	6.789
Mediana	8.216
Máximo	10.323