

ESTRATEGIA DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE EN LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN ACUÍFERO: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA.

Igle C. Umbría Núñez¹

Universidad de Los Andes, NURR-Trujillo, Grupo de Investigación GEOCIENCIA.

Resumen

El propósito del presente trabajo es facilitar algunas herramientas básicas para la comprensión y el manejo de una metodología sencilla en el contexto de la aplicación de software para simulación del comportamiento de acuíferos en asignaturas de la carrera de Ingeniería Agrícola. Esta investigación promueve que al estudiante se le otorgue mediante los procesos de enseñanza-aprendizaje, una forma útil de procesar datos, simular situaciones, estimar recarga y descarga de acuíferos, aplicar la geoestadística y proponer soluciones ante la posibilidad de aprovechamiento del agua subterránea. La aplicación y manejo de software específicos dentro de los programas de la carrera permitirá la obtención de soluciones prácticas a los problemas de la humanidad y el medio ambiente. La metodología propuesta, se desarrolló mediante un cronograma de actividades teóricas-prácticas dentro del programa curricular de la asignatura Aprovechamiento de Aguas Subterráneas de la carrera Ingeniería Agrícola, basado en un ejemplo real del acuífero ubicado en Palmeras El Puerto de Santa Cruz del Zulia.

Palabras claves: Metodología, Simulación, Aguas Subterráneas, Acuífero, Enseñanza, Programas de computación.

A TEACHING-LEARNING STRATEGY IN THE SIMULATION OF THE BEHAVIOUR OF AN AQUIFER: A METHODOLOGICAL PROPOSAL.

Abstract

The purpose of this paper is to facilitate some of the basic tools for the understanding and management of a simple methodology in the context of application of software for simulation of the behaviour of an aquifer on the courses in Agricultural Engineering program. This investigation promotes the need to educate students through the teaching-learning process, a useful way to process data, to simulate scenarios, to estimate the recharge and the discharge of an aquifer, to apply geostatistical principles and to propose solutions in view of the possibility to take advantage of groundwater resources. This proposal intends to integrate the different courses of the study plan in the teaching and application of specific software, as a way to obtain practical and applicable solutions to the problems of humanity and the environment. To achieve the proposed methodology, a chronogram of theoretical and practical activities was included. These activities are based on a real example of the aquifer located in Palmeras El Puerto de Santa Cruz del Zulia

Keywords: Methodology, Simulation, Groundwater, Aquifer, Teaching, Software.

Generalidades

La historia de la evolución de los computadores puede ser dividida en períodos arbitrarios

¹ Ingeniera, Msc. Docente-Investigadora. email: igleumbria@cantv.net

de tiempo, pudiéndose tomar como referencia para su inicio, cuando el hombre comienza a organizarse socialmente, en este momento surge los primeros métodos de conteo basados en el hecho biológico de los dedos que el hombre posee. A partir de los cuales se establecieron las primeras técnicas de conteo, un poco primitivas y bastantes limitadas. Mucho tiempo después surge el concepto que define al computador como un equipo electromecánico capaz de procesar información en forma rápida y confiable de acuerdo a un conjunto de instrucciones específicas y precisas denominadas programas (Pinder, 1991). Estos programas son en la actualidad herramientas indispensables en el aprendizaje y el buen desarrollo de cualquier unidad curricular, pues aporta al estudiante la destreza para proponer soluciones a problemas de diferente índole que se puedan presentar luego en su ejercicio profesional (Parra, et. al., 2001; Santiago, 2001). En este orden de ideas, y en el entendido que el agua dulce superficial es un recurso cada vez más limitado, se hace interesante el hecho que el estudiante como futuro profesional de la ingeniería agrícola esté en la capacidad de formular reparos a este tipo de problemas, mediante la utilización del recurso de los acuíferos, a través del manejo certero de software de agua subterránea, proponiendo políticas para el aprovechamiento del recurso.

Este ejercicio profesional, implica por lo menos un mínimo de conocimientos en lo que se refiere al manejo de la información, al aporte científico y a la cantidad del recurso con el que se cuenta. En el caso de esta investigación, es necesario partir de la premisa que la mayoría del agua dulce de los continentes se encuentra subterránea. Esta representa el 0.62% del total del agua que contiene el planeta Tierra, frente a los ríos y lagos que representan el 0.017%. Para que el agua pueda penetrar en las rocas y circular por ellas, estas tienen que ser porosas, o estar fracturadas, o fisuradas, entendiéndose por porosidad el tanto por ciento de poros o huecos en el volumen total de la roca. Para las aguas subterráneas solo tiene interés la porosidad eficaz la cual se entiende como el porcentaje de poros interconectados entre sí. A las formaciones geológicas que permiten la circulación del agua por estos poros se les denomina acuíferos. En el subsuelo se tienen dos zonas diferenciadas: una inferior, saturada de agua y otra superior no saturada, llamada zona de aireación o vadosa, por lo que la superficie que separa la zona de aireación de la zona saturada se denomina nivel freático y este nivel fluctuará verticalmente a lo largo del tiempo. Acuícludo es la formación geológica que conteniendo agua en su interior no la transmite y por tanto no es posible su explotación. Otro concepto es el acuitardo, formación que conteniendo agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para captaciones, pero que si permiten una recarga de otro acuífero.

Un estudio donde se evalúe las reservas de un acuífero ubicado en un área determinada, constituye el aspecto central para determinar y cuantificar el nivel de explotación del mismo, con fines de cubrir los requerimientos de agua de una zona. 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 (Hantush, 1967). Aplicando estos métodos matemáticos y modelos apropiados, se pueden ahora resolver una serie de problemas relacionados con el desarrollo de las aguas subterráneas. Sin embargo, para 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. Es por ello que esta investigación espera demostrar, además, a los alumnos que la era digital no aguarda en un futuro lejano sino que ya se está inserto en ella. Sin embargo, muchos ignoran este hecho elemental y persisten en viejos hábitos, sin ánimo de adelantarse a los tiempos ni invocar un futuro utópico; sino todo lo contrario, la idea es tratar de concretar aquí y ahora lo que ya está disponible en las mentes y en las máquinas modernas. Dentro de este contexto, el presente trabajo pretende aportar elementos para definir políticas de explotación coherentes de acuíferos, para alcanzar metas de desarrollo acorde con las necesidades, a través de la enseñanza y aplicación de programas de computación específicos.

Objetivo

Diseñar una propuesta metodológica mediante la aplicación de una estrategia de enseñanza-aprendizaje en la simulación del comportamiento de un acuífero con fines de aprovechamiento humano.

Marco conceptual

El estudio para la simulación de un acuífero y su comportamiento demanda del conocimiento previo en ciertos parámetros técnicos y teórico-práctico. En el caso de esta investigación se detallan a continuación los aspectos conceptuales considerados: Los procesadores de textos y su aplicación en el plano educativo

Los procesadores de texto son valiosos auxiliares en la labor docente, así lo confirma Trujillo (2000). En realidad, un procesador de textos es, como su nombre lo sugiere, un software creado para "procesar", es decir, para trabajar con textos: moldearlos, armarlos, darles un formato específico y enriquecerlos de mil maneras. Mientras un software según la definición de Trujillo (2000) es un "programa de computadora..., serie de instrucciones responsables de que el hardware, es decir, la máquina, realice su tarea". Aún cuando los programas no fueron inicialmente desarrollados para auxiliar al maestro en su labor, ciertamente han llegado a convertirse en una herramienta muy útil para hacer más rápido y eficiente el manejo, archivo y procesamiento de información en la cotidianidad del aula.

Según Bator y Denham (2002) la tecnología se desarrolla a una velocidad tan grande que es difícil determinar sus rumbos, su calidad y sus aplicaciones educativas. Sin embargo, en la realidad venezolana la aplicación de nuevas tecnologías en las áreas de la educación se mueve tan lentamente que la brecha entre la tecnología y el proceso educativo se hace cada día más amplia. Es difícil hoy encontrar suficientes personas del ámbito tecnológico que puedan orientar al docente en la selección de los mejores instrumentos educativos. Por otro lado, la actualización de tecnologías en el ámbito educativo debe considerar el momento más adecuado, las necesidades reales, así como los costos y consecuencias en la adopción de las nuevas tecnologías. El importante tener presente que el uso y aplicación de los procesadores de textos en el plano educativo redundara en beneficio tanto de los educandos como del educador, como de su entorno.

La modelación de acuíferos

Custodio y Llamas (1976) definen como modelo de acuífero al procedimiento, ya sea analítico, numérico o analógico que permite realizar la simulación de su comportamiento. Un modelo es tanto más representativo del sistema real, cuando es capaz de reproducir más fielmente su comportamiento, es decir, reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que lo gobiernan.

Mientras tanto, Rodríguez (1986) expone que aún con las limitaciones y restricciones que le son propias a los modelos de simulación, su uso puede ser plenamente justificado cuando se trata de predecir el impacto de la interferencia del hombre al disponer de los recursos del agua subterránea.

Asimismo, Llanusa et al, (1990) consideran que los objetivos de los modelos actuales llevan a considerar dos etapas de trabajos:

- En la primera etapa, llamada calibración, el modelo matemático es una herramienta de trabajo que permite verificar, corroborar, modificar y completar los planteamientos conceptuales previos formulados en el estudio hidrogeológico.
- En la segunda etapa, denominada de pronóstico, el modelo matemático se convierte en un instrumento de planificación, respondiendo a la necesidad de predecir las consecuencias que producirán en los acuíferos, una serie de alternativas de explotación, alcanzando la máxima utilidad si se conocen sus limitaciones.

Geoestadística

La geoestadística es una técnica desarrollada a principio de los años sesenta que ofrece un conjunto de herramientas con las que se puede abordar el análisis de los componentes de variabilidad aleatoria de los fenómenos geológicos ó naturales (Isaaks, E and Srivastava, 1989; Samper, 1994). Para Matheron (1962; citado por Samper y Carrera, 1990) es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y evolución de los fenómenos naturales, y la concibe como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio, Mientras, Journel (1979; citado por Mora, 1996) la define como la rama de la estadística dedicada al estudio de los fenómenos espacialmente distribuidos.

En tanto Guiguer (1991) define los modelos como instrumentos que ayudan a comprender los procesos físicos, químicos y bioquímicos que tienen lugar en los sistemas de agua subterránea y las interacciones entre estos, a la vez que proveen de información necesaria para lograr un manejo de estos procesos benéficamente y sin daño al entorno.

En el igual orden de ideas, Samper (1994) argumenta que un modelo es la representación simplificada de la realidad física. Esta realidad física es el medio subterráneo, además sostiene que los resultados más importantes hasta la fecha de la aplicación de la geoestadística al estudio del ambiente subterráneo, son los siguientes:

- La explicación de los efectos de escala de la permeabilidad y la dispersividad.
- La existencia y obtención de parámetros a distintas escalas.
- El desarrollo de métodos de simulación estocástica condicionada.

- El desarrollo de técnicas para el diseño óptimo de redes de muestreo y control hidrogeológico.

Al respecto, Gómez y Mora (2000) señalan que el SURFER, es un programa (SOFTWARE), que permite el manejo eficiente de la información geodésica, este está orientado específicamente hacia el campo topográfico y las aplicaciones más comunes como son: la creación de mapas de isolíneas o mapas de superficies en tres dimensiones. Desde un archivo tipo XYZ se produce un archivo tipo Malla (GRID) y a partir de este último se puede crear un mapa de isolíneas o un mapa de superficie.

La Simulación

Edelman (1979) define la simulación como un sistema para conocer cómo cambian sus estados y predecir y controlar dichos cambios. Al respecto, Maisel y Gnugnoli (citados por Coss (1994) consideran a la simulación como una técnica numérica para realizar experimentos que involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos, para describir el comportamiento de sistemas en negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos períodos de tiempo. Para Shannon (citado por el mismo autor, 1994) la simulación es el proceso dirigido a diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo. Esto con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

En geostatística, el objetivo de la simulación es la generación de funciones o conjuntos de valores de una variable hidrogeológica consistente con la información disponible (Candela, 1991). Miyashiro (1996), afirma que los estudios de aguas subterráneas generan una gran cantidad de información, que necesariamente se puede procesar y presentar en forma comprensible, de rápida visualización, de un modo práctico para la identificación y análisis de los parámetros obtenidos.

El programa WinFlow (Groundwater flow model)

WinFlow es un software empleado para el modelado de agua subterránea, poderoso y fácil de usar, desarrollado por Doug Rumbaugh (SSG, 2004). Este es similar al difundido modelo QuikFlow, desarrollado por Jim Rumbaugh. La mayor ventaja de WinFlow sobre QuikFlow es su compatibilidad con Microsoft Windows™ V3.1. WinFlow. En realidad, WinFlow es un programa en Windows que incorpora una interfase para múltiples documentos; por ello no es un programa apto para correr en Windows bajo el entorno de Dos. Este es un modelo simple de usar y altamente interactivo, que permite al usuario crear un modelo analítico en minutos. El software utiliza menús comúnmente incorporados en Windows para facilitar el diseño del modelo. WinFlow permite al usuario la producción de gráficos para reportes de calidad, utilizando cualquier manejador de Windows. Una de las bondades del software es su flexibilidad para exportar una amplia variedad de formatos de archivos, tales como SURFER, Geosoft, Spyglass, Windows Metafiles, y archivos compatibles con AutoCAD (SSG, 2004).

Antecedentes al estudio de acuíferos: Palmeras el Puerto, Santa Cruz del Zulia Umbría y Jégat (2001), evaluaron las disponibilidades del recurso de agua subterránea

en una porción del acuífero ubicado en el sector Palmeras el Puerto, en Santa Cruz del Zulia – Venezuela. Los resultados del trabajo permitieron establecer políticas de explotación con fines agrícolas, debido al alto valor productivo de las tierras en esa región del país. El estudio facilitó 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 en la zona que comprende el estudio, trabajándose a régimen no permanente con el acuífero libre mediante la propuesta de instalación de dos pozos de extracción de agua. Básicamente 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, justificándose suponer extracciones de agua. Para ello se tomo en cuenta lo necesario para cumplir con la demanda evapotranspiratoria, hasta descargas que equivalían a la suma de ésta con caudales que involucran otros usos. Se realizaron simulaciones para establecer políticas de explotación en las que se tomó una recarga del acuífero del 5% del caudal mínimo del río, más el aporte por precipitación. Dicho procedimiento permitió comprobar que no se puede sacar agua de los pozos cuando el caudal extraído supera los 50 m³/día, ya que los abatimientos son muy grandes. Como resultado se obtuvo que las alternativas de explotación ideales son aquellas que no implican fuertes abatimientos, por lo cual se recomienda para su implementación, entre de 50 m³/día y 20 m³/día. Por otra parte, se determinó la posibilidad de implementar una metodología de riego basada en la sub-irrigación, puesto que no se comprometen de forma determinante las reservas estimadas del acuífero.

Marco metodológico propuesto.

La metodología propuesta en el presente trabajo parte del procesamiento de los datos de niveles freáticos, medidos mensualmente durante un determinado número de años:

Elaboración de archivos

Para la producción de los archivos se crea un registro de datos XYZ, o mapa de isolinéas útil para ser trabajado en el programa Winflow.

Caracterización geoestadística de los parámetros del acuífero

Esta se labora siguiendo la caracterización geoestadística o análisis estructural propuesta por Samper y Carrera (1990) la cual implica 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

El modelo se desarrolla a partir del estudio de los variogramas y la técnica de estimación del Krigeado:

El semivariograma: la formalización de la teoría de las variables regionalizadas se hace mediante el semivariograma o simplemente variograma. El variograma puede considerarse como una función modificada de la función de autocorrelación de la teoría de las funciones aleatorias.

Krigeado: Si bien el estudio de los variogramas aporta datos relativos al comportamiento de una variable (continuidad, ciclicidad), es por la técnica de estimación denominada krigeado (David, 1977) en que la Geoestadística ha despertado un mayor interés, no solo en hidrología subterránea, sino también en otros campos. El objetivo del krigeado es encontrar la mejor estimación o predicción lineal posible de una variable a partir de la información disponible, valores muestrales y relaciones de dependencia espacial, imponiendo como criterio para ello la ausencia de sesgo y la minimización de la varianza de la estimación.

El método matemático se puede resumir en los siguientes pasos:

- Supone conocer la forma de la deriva en base a razonamientos físicos.
- Ajustar por medio de mínimos cuadrados la deriva $Z(x)$ a los datos medidos. La deriva se expresa generalmente como combinación lineal de monomios independientes del tipo $ax, by, cxy, dx^2, ey^2, \dots$.
- Calcular los residuos.
- Calcular el semivariograma experimental de los residuos ajustándole un semivariograma teórico.
- Realizar el krigeado ordinario de los residuos utilizando el semivariograma teórico ajustado.
- Obtener el valor krigeado de la variable $Z^*(x)$ en un punto no muestreado como suma del valor de la deriva $Z(x)$ en ese punto más el valor del krigeado del residuo.
- El ajuste de la superficie de deriva se hace en dos fases. En la primera fase se identifica el grado del polinomio. Para ello se ajustan polinomios de grado creciente hasta encontrar que el variograma de los residuos sea aproximadamente isotrópico y estacionario. Las características analíticas de la superficie de deriva que se encuentre, se pueden hallar en deducciones clásicas de geometría analítica.

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

Desarrollo de la investigación

El procedimiento para la recopilación y análisis de la información se realizó mediante la aplicación de la técnica del Kriging y Variogramas (David, 1977). Posteriormente se procedió a la simulación del comportamiento de acuífero siguiendo el programa WinFlow para tal fin.

Modelo Kriging y Variogramas

El algoritmo utilizado por el método Kriging contempla 4 características esenciales:

1. Cálculo de los pesos o coeficientes (ponderados) para interpolación: el algoritmo considera el espaciamiento entre los puntos a ser interpolados y la ubicación de los datos, así como el espaciamiento entre los datos.
2. Cálculo de los pesos utilizados para interpolar información: el algoritmo considera la escala inherente a los datos. Por ejemplo, la topografía la cual puede variar

de plana a montañosa. En el caso de Kansas (mas plana) varia espacialmente mucho mas lentamente que la topografía de Colorado (más montañosa). Consideremos por ejemplo dos elevaciones observadas que están separadas por 5 millas. En Kansas es razonable considerar una variación lineal entre las dos observaciones, en cambio esta consideración no seria realista en la topografía de Colorado. El algoritmo ajusta los pesos utilizados en la interpolación acorde con este hecho.

3. Cálculo de los pesos utilizados en la interpolación: el algoritmo toma en cuenta la validez de los datos. Si los datos observados son confiables y precisos, la superficie interpolada considerará cada uno de ellos. Por otra parte, si se sospecha de la veracidad de los datos, la superficie interpolada no incluirá aquellos valores que sean muy distintos a otros valores observados en áreas contiguas.

4. Los fenómenos naturales son producto de procesos físicos: estos procesos físicos frecuentemente tienen orientaciones preferenciales. Por ejemplo, en la cabecera de un río los materiales más gruesos sedimentan más rápido, mientras los más finos tardan más tiempo en sedimentar. Por lo tanto, mientras más lejos nos encontremos de la cabecera del río, más finos serán los sedimentos. Cuando el algoritmo realiza las ponderaciones para la interpolación, estas variaciones o falta de isotropía son consideradas. Cuando un punto es interpolado, una observación que esta a 100 metros de distancia, pero en una dirección paralela al borde del río, es considerada como un valor similar a otros valores presentes en el borde del río, a pesar que pueda estar mas cerca de un punto ubicado perpendicularmente a ese borde.

Los puntos dos, tres y cuatro incorporan características relacionados con los procesos presentes en los lugares donde las observaciones fueron tomadas. La correspondiente escala espacial, repetición de datos y no-isotropía, no son funciones de la ubicación de los datos.

Modelo de simulación

Para realizar el modelo de simulaciones se parte de un mapa base donde varían los valores de conductividad eléctrica y el tiempo. En este sentido, WinFlow es un modelo analítico que permite simular, en dos dimensiones, flujo subterráneo en regímenes permanente y no-permanente (SSG, 2004). El módulo de flujo permanente simula el flujo de agua subterránea en un plano horizontal aplicando las expresiones analíticas desarrolladas por Strack (1989). El modelo de flujo no permanente utiliza las ecuaciones desarrolladas por Theis (1935) y por Hantush y Jacob (1955) para acuíferos confinados y semiconfinados respectivamente. Cada modelo emplea los principios de superposición para evaluar los efectos derivados de múltiples funciones analíticas (por ejemplo múltiples pozos) en una área uniforme de flujo correspondiente a una región determinada.

El modulo de flujo permanente simula los efectos derivados de los siguientes elementos analíticos en flujo bidimensional: pozos operando, recarga uniforme, áreas circulares de recarga y descarga, así como líneas de contribución y de recepción de flujo. El modelo permite considerar cualquier número de los elementos mencionados, pudiendo trabajar bajo un gradiente hidráulico uniforme. El modelo representa el movimiento del agua utilizando líneas de flujo, trazas de partículas, y líneas de igual carga hidráulica

(piezométricas). Las líneas de flujo son calculadas semi analíticamente para ilustrar la dirección del flujo del agua subterránea. Técnicas de seguimiento de partículas son implementadas numéricamente para calcular tiempos de viaje y dirección del flujo. Tanto los acuíferos confinados como los no confinados son simulados con el modulo de flujo permanente.

El modulo de flujo no permanente simula los efectos de pozos, lagunas circulares, líneas de recepción, y gradiente hidráulico uniforme para acuíferos confinados y semiconfinados. Técnicas numéricas de seguimiento de partículas también son disponibles en este modulo. El modulo de flujo no permanente calcula la carga hidráulica mediante la ecuación para acuíferos confinados (Theis, 1935) y la ecuación para acuíferos semiconfinados (Hantush y Jacob, 1955). Para flujos no permanentes, el programa WinFlow es considerado el más favorable y simple de aplicar, pues este permite crear un modelo analítico en minutos. Además, de las ventajas que este programa posee para trabajar en ambiente Windows.

La información utilizada para el cálculo de los datos fue proporcionada por los estudios realizados en el acuífero localizados en el sector "Palmeras el Puerto" de Santa Cruz del Zulia. La recopilación de la información permitió, mediante un análisis, caracterizar el sistema acuífero. De hecho, para finales del año 1993, se instaló una red de observación, diseñada para hacer un estudio de los niveles freáticos, presentado por Laguna y Marquina citados por Umbría (2000), para lo cual y desde entonces, se realizan observaciones periódicas mensuales. En este trabajo se realizó el procesamiento de los datos mensuales, desde enero de 1994 y hasta diciembre de 1999, elaborándose tres archivos del tipo XYZ, uno para los niveles medios mensuales del total de los cinco años mencionados, uno para el día 9 de marzo de 1994 y un último para el día 9 de marzo de 1999. Para el análisis se consideraron datos de 65 piezómetros instalados a profundidades que están entre los 3m y 5m. En el estudio del comportamiento del pozo se tomó como base la información aportada por la prueba de bombeo, realizada al pozo que se encuentra ubicado dentro de la red de observación y el cual tiene 144m de profundidad.

Análisis e interpretación de datos

Las etapas anteriormente desarrolladas permitieron obtener una visión conceptual del fenómeno mediante un conocimiento de sus causas y características hidrogeológicas. Los datos son objetos de una interpretación preliminar a fin de eliminar aquellos que son erróneos (niveles por debajo del fondo del pozo, datos repetidos, etc.) y confirmar o desechar una hipótesis. De este análisis y estudio de los datos, surge como consecuencia la conveniencia de realizar una preparación de datos. Esta decisión se ve apoyada en el cálculo del variograma, el cual tiene un mejor comportamiento al presentar menos oscilaciones y mostrar con más claridad la estructura de la variable transformada que la estructura de la variable sin transformar, por estar apoyadas en datos cualitativos. Para el cálculo se necesita de un amplio conocimiento de la variabilidad del fenómeno en estudio y así de esta manera extrapolar el comportamiento del mismo, a partir de pocas observaciones. Mora (1996), establece que con la finalidad de caracterizar el comportamiento estructural de los datos, se realiza el análisis de variabilidad espacial de cada parámetro, para posteriormente ajustar el variograma definido a un modelo teórico.

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 (Candela, 1991). 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.

Evaluación del funcionamiento del acuífero:

La evaluación permitirá el conocimiento de la superficie piezométrica, de la dirección del flujo y de la recarga natural tomando en cuenta las características hidrogeológicas del mismo. 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 pruebas en WINFLOW a partir del mapa base de niveles iniciales proporcionado por Umbría (2000). Los valores del dato de conductividad hidráulica se alteran desde el valor medio calculado (0,696 m/día) basado en los ensayos hechos por Laguna y Marquina (citados en Umbría, 2000), hasta valores tan pequeños (0,035 m/día) que evidencian que no hay movimiento alguno de agua en el acuífero o valores lo suficientemente altos como para obtener un patrón de referencia a la hora de aplicar las políticas de explotación.

Tomando como cero la recarga y la descarga e introduciendo diferentes tiempos con el fin de verificar el modelo y observar como se comporta el acuífero al variar éstos parámetros solamente, y asumiendo que éste es un acuífero de características homogéneas cuyo fondo se fija a los 20 m de profundidad y el tope a los 0 m, al nivel del terreno. El modelo se calibra a partir de los diferentes valores de conductividad hidráulica, específicamente considerando seis valores distintos, los valores del tiempo se varían en 1 día, 1825 días (5 años) y 3650 días (10 años).

Para trabajar el modelo en régimen no permanente es importante incluir los valores de parámetros tales como: Coeficiente de almacenamiento, descarga y el tiempo computado para obtener una solución. Es necesario conocer e identificar la dirección general del flujo, si coincide con la topografía del terreno, es decir, desde las partes altas hacia las más bajas.

Cronograma de actividades teórico-práctico

Una de las finalidades de este trabajo es familiarizar al estudiante con el entendimiento, manejo y práctica de algunos modelos de computación para simular una situación o problema en aguas subterráneas, específicamente en políticas de explotación de acuíferos. A tal efecto, se presenta un cronograma de actividades teóricas-prácticas, que pudiera ser aplicado dentro del programa curricular de la asignatura Aprovechamiento de aguas subterráneas de la carrera Ingeniería Agrícola. (Véase Figura 1). El cronograma parte de la experiencia arrojada en cada una de las fases seguidas en este proyecto de investigación.

Actividad. (Contenido)	Semana N° 1		Semana N° 2		Semana N° 3		Semana N° 4	
	HT	HL	HT	HL	HT	HL	HT	HL
Modelos de un acuífero Geoestadística, Introducción al SURFER, Kriging, variograma, WinFlow.	3	3	1	1				
Simulación Elaboración de archivos, Aplicación del modelo matemático, recopilación y análisis de la información.			2	2	2	2		
Realización de simulaciones Evaluación del funcionamiento del acuífero.					1	1	1	1
Aplicación de políticas de explotación.							2	2

Figura 1 : Programa del curso : Aprovechamiento de aguas subterráneas

Conclusiones

Esta investigación permitió delinear un instrumento que pueda facilitar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Agrícola la aplicación de nuevas tecnologías para resolver con mayor efectividad y eficiencia los problemas del mundo real. El instrumento consiste en la enseñanza teórico y práctica de una serie de programas de computación y de metodologías para la simulación y evaluación en el comportamiento de las aguas subterráneas.

La enseñanza de programas de computación dentro de las unidades curriculares de la carrera Ingeniería Agrícola, deberían estar orientados a convertir la realidad inmediata como objeto de procesos pedagógicos y didácticos. Pues el fin primordial de los procesos educativos debe estar encaminado hacia el estudio científico de las dificultades y limitaciones que los recursos, especialmente el recurso agua, tienen para el desarrollo sostenible del ambiente.

Es necesario que el estudiante obtenga un conocimiento previo, cuando se enfrente a un caso de aguas subterráneas. Particularmente, cuando los actuales procesos educativos demandan modernización ante los grandes avances en el campo del análisis matemático y técnicas de simulación sobre problemas del flujo de agua en el suelo. El modelo permitió demostrar que la aplicación adecuada de métodos matemáticos y modelos apropiados, pueden llegar a resolver una serie de problemas relacionados con el aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Agradecimiento

El autor agradece al Concejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de los Andes por el financiamiento aprobado a la presente investigación:
Proyecto (Código NURR-C-266-99-01-C).

Referencias bibliográficas

CANDELA, L. (1991) Aportaciones de la estadística a la Hidrología Subterránea. En Anguita, F.;

- CANDELA, L. y Zambrano, M. (Editores) Curso Internacional de hidrología subterránea, Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos, pp.: 103-120
- COSS, R. (1994) Simulación. Un enfoque práctico. Editorial LIMUSA S.A. México D.F. México.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, R. (1976) Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España.
- DAVID, M. (1977) "Geostatistical or reserve estimation". Elsevier Scientific Publishing Company. New York, 1977.
- EDELMAN, J. (1979) Modelos de Simulación: Método GSIM. En Duek, J. (Editor). Métodos para la evaluación de impactos ambientales incluyendo programas computacionales. CIDIAT. Mérida.
- GÓMEZ, F y MORA, L (2000) Material de recopilación con fines docentes sobre el manejo del Software SURFER. CIDIAT, Mérida.
- GUIGUER, N. (1991) Uso de Microcomputadores en Hidrogeología. CEPAS. Sao Paulo. Brasil.
- HANTUSH, M and JACOB, C. (1955) Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Eos Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 36, pp. 95-100.
- HANTUSH, M (1967) Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation, Water Resources Research, Vol.3, No. 1, pp. 227-234.
- ISAAKS, E and SRIVASTAVA, R. (1989) An introduction to applied Geostatistics, Oxford University Press, New York.
- LLANUSA R., H., DILLA S., F., HERNÁNDEZ V., A., MARTÍNEZ R., J. Metodología para la calibración de modelos matemáticos de acuíferos subterráneos. Imprenta ISPJAE, La Habana, Cuba, Marzo 1990.
- MIYASHIRO, K. (1996) Evaluación estocástica de políticas de explotación del agua subterránea. Aplicación al acuífero del Valle de Quibor. Tesis de Maestría, CIDIAT. Mérida.
- MORA, L (1996) Aplicación de métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros de calidad de agua en acuíferos. Tesis de Maestría, CIDIAT. Mérida.
- PARRA, A.; CEVALLOS, B., TINOCO, A.; LÓPEZ, A. (2001). El juego y la enseñanza de las ciencias sociales. Revista Geoterra Didáctica. Vol 1, N° 1, 85-88.
- BATTRO, M. A. y DENHAM, J. P. (2002) La educación digital. Disponible en: <http://www.byd.com.ar/edwww.htm>

- PINDER, G. (1971). An Iterative Digital Model for Aquifer Evaluation. Archivo interno USGS.
- SAMPER, F. y CARRERA, J. (1990) Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.
- SAMPER, F. (1994). Métodos estadísticos y geoestadísticos. En Bocanegra, E. y Rapaccini, A. (Editores) Temas Actuales de la hidrología subterránea, pp. 37 – 60. Mar de Plata: Consejo Federal de inversiones. Argentina.
- SANTIAGO, J.(2001) Para enseñar geografía con los proyectos pedagógicos de aula. Revista Geoterra Didáctica, Vol 1, N° 1, 109-117. Trujillo Venezuela.
- SCIENTIFIC SOFTWARE GROUP, SSG (2004) WinFlow - analytical steady-state and transient groundwater flow model - confined and unconfined aquifers. Available at: http://www.scisoftware.com/products/winflow_overview/winflow_overview.html
- STRACK, O. (1989) Groundwater Mechanics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- THEIS, C. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Eos Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 16, pp. 519-524.
- TRUJILLO, L. (2000). Los procesadores de texto: valiosos auxiliares en la labor docente. Revista Red Escolar, Año 3, Vol especial, N°8. Disponible en <http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/Revista/08/articulos/04.html>
- UMBRÍA, I. (2000). Evaluación del Acuífero Ubicado en el Sector Palmeras El Puerto en Santa Cruz del Zulia con Fines de Explotación Agrícola. Tesis Maestría, CIDIAT, Mérida.
- UMBRÍA , I.;y JÉGAT, H.(2001) Evaluación del Acuífero Ubicado en el Sector Palmeras El Puerto en Santa Cruz del Zulia con Fines de Explotación Agrícola. Revista Geoterra Didáctica. Vol 1, N° 1, 75-84.