

Evaluación del flujo de agua superficial y subterránea en la Ciudad Universitaria de Caracas. Resultados en avance.

Victor Obregón. Escuela de Ingeniería Civil, FI/UCV
Iván Saavedra. Instituto de Mecánica de Fluidos FI/UCV
Melín Nava. FAU/UCV

Resumen

Una de las principales evidencias que ocasiona el deterioro en la CUC es el referido al aumento de problemas asociados al agua como factor de riesgo en el campus. Este trabajo, en avance, establece las bases, a través de la utilización de un modelo matemático, para la instalación de una red de control de niveles freáticos en la Ciudad Universitaria de Caracas. Mostramos aquí los resultados de la fase 1 del subproyecto de Evaluación Hidrogeológica adscrito al Proyecto N° 2001002590 de FONACIT, el cual busca determinar los factores que deben ser controlados para la reducción eficaz de la vulnerabilidad en este sector. Esta fase ha sido implementada en la zona del Estadio Olímpico y ha definido las condiciones del acuífero aquí ubicado, que es uno de los dos que se encuentran en nuestro territorio.

Abstract

One of the main causes of deterioration in Caracas' university campus are the increasing problems related to water as a risk factor. With the help of a mathematical model, this work sets the bases for the installation of a network aiming to control the phreatic stratum. Here we present the results of the phase 1 of the Hydrogeological Evaluation Sub-Project assigned to Project n° 2001002590 of FONACIT, which pretends to establish the factors that should be controlled for the efficient reduction of vulnerability in this sector. This phase has been carried at the Olympic Stadium area, and has defined the conditions of the aquifer located there, one of the two aquifers of our territory.

Antecedentes del contexto de estudio

La Ciudad Universitaria de Caracas (CUC) sobresale como un conjunto autónomo enclavado dentro del centro geográfico de la capital venezolana, rodeado por las principales arterias viales y la serranía del Jardín Botánico. La preservación y reducción de la vulnerabilidad de la CUC, reconocida como Patrimonio Cultural Mundial de la Humanidad por la UNESCO en el año 2000, depende del conocimiento de las zonas de riesgo, sus áreas de incidencia y el impacto de los tipos de amenaza que se identifican en nuestro conjunto arquitectónico.

En 1942 comenzaron los estudios necesarios para la construcción de la nueva Ciudad Universitaria de Caracas, para cuya ubicación se escogieron los terrenos pertenecientes a la histórica Hacienda Ibarra, situada en el valle comprendido entre las colinas al Sur del Parque Los Caobos y antes de la confluencia de los ríos Valle y Guaire. Ya para el año 1944 se inicia la construcción del urbanismo de la Ciudad Universitaria y se contrata la construcción de los edificios de Medicina. El marco urbano fue construido sobre un terreno ubicado a una cota de 870 m.s.n.m. Este conjunto arquitectónico tiene más de ochenta edificaciones y diversos espacios públicos distribuidos en un área de terreno de unas 202 hectáreas, con una cota promedio superior a 20 metros por encima de la cota de la confluencia de los ríos Guaire y Valle.

Considerando fundamentalmente la importancia estratégica que este proyecto tuvo en Venezuela en un momento histórico y la condición de Patrimonio Mundial Cultural que tiene este recinto, debemos abordar el reto de profundizar los estudios necesarios para garantizar de la manera más efectiva las condiciones técnicas de preserva-

Descriptor:

Red de control de niveles freáticos; Modelo de simulación de aguas subterráneas

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 22-II, 2006, pp. 35-42.
Recibido el 21/07/05 - Aceptado el 20/02/07

ción y disminución de riesgos ante eventos naturales que permitan salvaguardar nuestro campus. Es por ello que reviste particular interés la aplicación de medidas correctivas y de preservación que garanticen la conservación del conjunto arquitectónico existente, reduciendo los factores vulnerables del complejo, lo cual representa el gran reto de la Ingeniería. La realización de mecanismos de estabilización y aprovechamiento racional del flujo subterráneo permitirá desarrollar mecanismos ocultos y eficientes en el control de asentamientos de la CUC, construida en un sector de particulares características hidrogeológicas que han sido consideradas.

Dentro del terreno que conforma la CUC, existen varias zonas en las cuales se desea estudiar el posible abatimiento del nivel freático y las posibles manchas de inundación que se originen por el desbordamiento de nuestros ríos cercanos, en el marco del Programa "Estudio de Vulnerabilidad y Gestión de Riesgo" que lleva a cabo el Consejo de Preservación y Desarrollo de la Universidad Central de Venezuela (COPRED). Esto origina la necesidad de conocer y cuantificar características importantes propias del conjunto, entre las cuales se destaca la estabilidad del terreno y las características de las posibles zonas de inundación, ambas vinculadas a una serie de factores entre los que se pueden destacar la topografía, aspectos geológicos y geotécnicos, condiciones hidrológicas y características hidráulicas del comportamiento de los ríos y de los patrones de flujo del subsuelo. Por esta razón se realiza un estudio inicial a escala piloto basado en la aplicación de un modelo de simulación de aguas subterráneas en un sector de la Ciudad Universitaria de Caracas.

Área de interés

El estudio del agua subterránea y superficial es importante para la realización de obras de ingeniería que permitan diseñar los mecanismos para ejercer el control de amenazas por inundación o por contaminación y el aprovechamiento de las aguas subterráneas como fuente alterna de suministro de agua.

De la necesidad de predecir niveles freáticos futuros dado un caso de estudio comercial o industrial, sobre la base de parámetros de explotación, es que intervienen los modelos matemáticos, ya que no se podrían realizar ensayos de bombeo en forma continua sin perjudicar al acuífero o a la inversión económica, puesto que los ensayos cuestan tiempo y dinero.

La importancia del estudio de las aguas subterráneas se basa en la interrelación existente entre ellas y los

suelos que las poseen, ya que a su vez estos mismos suelos pueden soportar estructuras que podrían ser afectadas por la presencia o variación de las aguas. A su vez, estas son una fuente confiable, continua y económica, que no requiere complicados sistemas de tratamiento de potabilización, por lo cual se convierten en una solución alternativa de abastecimiento de agua para consumo humano y riego.

Estos temas sintetizan el interés que este trabajo puede tener para contribuir a la reducción de la vulnerabilidad por inundación y contaminación de acuífero que posee este conjunto urbano universitario, el cual no sólo es la sede de la universidad más antigua del país, sino de uno de los conjuntos de edificaciones modernas más significativo en el mundo actual.

¿Por qué modelaje matemático?

Los modelos matemáticos para estudio de flujo en sistemas a escala de planificación local o regional, permiten estimar el impacto de las acciones ejercidas en cada punto del sistema sobre otros puntos del mismo, a través de las modificaciones de la dinámica del fluido. Mediante la aplicación de tales modelos se facilita la predicción de los resultados de alteraciones impuestas por la actividad humana, cuyo efecto se complica por la interacción entre los procesos que ocurren en los sistemas, siendo entonces dichos modelos de gran importancia en estudios de aprovechamiento hidráulico o de impacto ambiental.

Estos modelos son representaciones simplificadas de fenómenos extremadamente complejos, donde se incorporan las influencias más importantes de acuerdo al propósito del estudio y, mediante la solución de ecuaciones descriptivas del fenómeno extremadamente complejas, las cuales permiten obtener en forma detallada la distribución espacial o la evolución en el tiempo de las variables del sistema estudiado.

La solución se calcula mediante un programa al cual se le introducen los datos de configuración geométrica, las condiciones iniciales y de contorno requeridas para la simulación del sistema físico. Una vez que el modelo ha sido desarrollado y calibrado, constituye una herramienta de gran utilidad para predecir los efectos de cambios introducidos al sistema físico estudiado. La flexibilidad de los modelos numéricos deriva de su facilidad para efectuar de una manera simple modificaciones en la geometría y dinámica del sistema, estudiándose así diferentes escenarios y condiciones de diseño mediante un mismo *software* de simulación.

Modelo de flujo de aguas subterráneas

El desarrollo de modelos para la estimación del patrón de flujo en aguas subterráneas se basa en las ecuaciones que gobiernan este movimiento tridimensional, el cual ocurre bajo la influencia de gradientes de elevación y de presión. Estos modelos representan una gran ayuda en estudios de impacto de obras civiles, ya que permiten, mediante un mismo programa, la evaluación de múltiples alternativas para disminuir la afectación de las obras existentes o proyectadas, permitiendo a su vez evaluar y cuantificar el aprovechamiento del recurso hidrogeológico con fines de abastecimiento humano o riego.

Para la implementación de un modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas, surge la necesidad de la obtención de datos actuales y registros históricos de los diversos parámetros involucrados en este fenómeno, por lo cual debemos realizar una serie de mediciones que permitan la obtención de estos valores y así poder contar con los datos necesarios que nos permitan conocer no sólo las características del flujo de las aguas subterráneas, sino también la posible afectación de las mismas a las estructuras aledañas, y a su vez, estudiar la posibilidad del aprovechamiento de las aguas subterráneas presentes en la Ciudad Universitaria de Caracas como una fuente alternativa de agua apta para consumo humano, lo cual permitirá disminuir la vulnerabilidad de nuestra Alma Mater ante los racionamientos de vital líquido.

En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo tridimensional de simulación de flujo de aguas subterráneas existente, basado en el Método de las Soluciones Fundamentales. Dicho método no necesita la construcción de una malla de cálculo y su formulación se desarrolla en forma sencilla, a partir de una combinación lineal de soluciones fundamentales situadas fuera del dominio del problema. Los coeficientes se determinan imponiendo condiciones de frontera en los puntos del contorno. En el caso de flujo potencial tridimensional la solución fundamental o función de fuente se expresa como:

$$\Phi^*(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \frac{1}{4\pi|\mathbf{P} - \mathbf{Q}|}$$

El modelo utiliza un procedimiento de refinamiento adaptativo, basado en conceptos tomados del análisis de regresión lineal múltiple, con una estructura de datos jerárquica para distribuir las fuentes a partir de una distribución gruesa inicial. Estas técnicas permiten alcanzar soluciones rápidas y precisas de los potenciales y sus derivadas normales.

El problema

La Ciudad Universitaria de Caracas se compone de un conjunto de edificaciones y espacios construidos en la década de los cincuenta. A través de los años, se ha ido apreciando una serie de afectaciones en las edificaciones que han motivado a las autoridades responsables de la conservación y preservación de este patrimonio mundial a la caracterización del acuífero existente. Para esto se hace imperativa la obtención de una serie de datos reales correspondientes a diversos parámetros hidrológicos, hidráulicos y geológicos que permitan la aplicación de un modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas.

La problemática actual radica en la carencia de datos representativos, que permitan la aplicación adecuada de un modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas, el cual a su vez nos permitirá conocer las características del acuífero existente y la posible incidencia de las aguas subterráneas en las estructuras adyacentes, así como también permitirá determinar la capacidad de explotación del acuífero como fuente alterna de suministro de agua apta para consumo humano.

Propuesta

La aplicación del modelo se realiza en forma preliminar en una zona piloto de la Ciudad Universitaria, observando la influencia de los parámetros hidráulicos y geométricos del modelo y de posibles cambios en las condiciones históricas del campus, particularmente los efectos de la extracción de 10 a 20 lps en los predios de la zona piloto. Para poder llevar a cabo el trabajo propuesto se procedió a realizar una serie de visitas de inspección que permitieron evaluar el estado actual de la infraestructura de pozos de abastecimiento, pozos de observación y perforaciones realizadas en la Ciudad Universitaria, así como el estado de la información hidrológica y geológica existente.

Los resultados del modelo permiten evaluar la importancia de los diferentes tipos de data medible para elaborar un plan de instalación de sensores, recopilación de datos y mediciones que permitirán la calibración y aplicación con capacidad predictiva de los modelos de simulación en estudios posteriores. De esta manera podrán crearse planes de seguimiento del comportamiento del agua en el subsuelo de la Ciudad Universitaria en un plazo mayor, con el propósito de estudiar el abatimiento del nivel freático y la utilización de las aguas subterráneas como medio alternativo de suministro de agua potable, así como la conservación de las aguas del subsuelo local en su relación con el acuífero de la ciudad de Caracas.

Se seleccionó al Estadio Olímpico de la CUC como una zona piloto de aplicación del estudio dada la cantidad y calidad de la información disponible de pozos y perforaciones existentes. Se recopiló en este sector la información geométrica y topográfica necesaria para la discretización del contorno y la aplicación simplificada del modelo matemático con una permeabilidad promedio. Las corridas de escenarios permiten diferenciar comportamientos del flujo a partir de la construcción del campus. Se estudia la sensibilidad del modelo a diferentes parámetros y condiciones de borde.

Metodología de investigación empleada

Se realiza una investigación de tipo documental, procediendo a una serie de entrevistas con el personal responsable de la administración y operación del sistema de pozos. A su vez se inicia una campaña de recolección de información y datos históricos sobre todo lo relacionado con aguas subterráneas y superficiales en la Ciudad Universitaria de Caracas, destacándose en esta búsqueda la necesidad de registros de medición de parámetros hidrológicos e hidráulicos, tales como: nivel freático, nivel estático y de bombeo (en los pozos), tirante y caudales (en los ríos), permeabilidad, porosidad, transmisibilidad, estratificación del suelo, precipitación y evaporación, etc.

Se efectúa una serie de visitas de inspección a cada uno de los componentes del sistema de pozos para analizar las características físicas y operacionales de los mismos, aprovechando para realizar un seguimiento de sus condiciones actuales de funcionamiento, así como también se comienza con la medición de los parámetros antes mencionados necesarios para la aplicación del modelo de simulación de flujo de aguas subterráneas.

El modelo de agua subterránea a aplicar en la zona piloto escogida es el desarrollado por el Prof. Iván Saavedra (2002), el cual se basa en la resolución numérica del flujo tridimensional con superficie libre en medio poroso, a través de la aplicación del método de soluciones fundamentales. En la implementación de este método, el movimiento de la superficie libre se expresa como una condición de contorno mixta y se discretiza utilizando interpolación mediante funciones de base radial, a fin de mejorar la resolución del contorno, además se utiliza un método iterativo para efectuar la solución del sistema lineal de ecuaciones obtenidos por la formulación de mínimos cuadrados del método de soluciones fundamentales.

Existe la necesidad de disponer de instrumentos que nos permitan estimar la factibilidad del aprovechamiento rentable y efectivo de las aguas subterráneas que existan

dentro de un acuífero de una región; dichos instrumentos deben permitir recurrir a la explotación de las aguas subterráneas como una fuente alternativa de suministro de agua potable.

Por estas razones y muchas otras no menos importantes se han desarrollado y aplicado técnicas de modelaje matemático cuya función principal es predecir los valores de una serie de variables de las aguas subterráneas existentes en una zona, las cuales dependerán de condiciones hidrológicas, hidráulicas, geológicas y de calidad del agua, existentes en la cuenca donde se encuentra el acuífero a estudiar.

Para la obtención de proyecciones futuras confiables y ajustadas a la realidad, debemos de recurrir a la obtención de valores históricos de todas aquellas variables de las cuales pensemos predecir su comportamiento futuro, así como también a todas aquellas condiciones existentes que afecten de manera directa o indirecta el comportamiento de o las variables a predecir. La obtención de los valores estimados de las variables a predecir, deberán relacionar las condiciones actuales del acuífero en estudio y las condiciones históricas del mismo, para así poder realizar las correspondientes calibraciones del modelo que nos permitan poder predecir de manera fiable el comportamiento del mismo.

Plan de mediciones de flujo de las aguas subterráneas en la Ciudad Universitaria de Caracas

Los procesos hidrológicos varían en el espacio y en el tiempo, y tienen un carácter aleatorio o probabilístico. Como se sabe, la precipitación es la fuerza motriz de la fase terrestre del ciclo hidrológico, y la naturaleza aleatoria de la precipitación hace que la predicción de los procesos hidrológicos dependientes de ella estén sujetos a un grado de incertidumbre relativamente alto si lo comparamos con el comportamiento futuro de edificaciones. Esta incertidumbre genera la necesidad de que las mediciones hidrológicas sean observaciones hechas en el lugar de interés o muy cerca de este, de tal manera que las conclusiones pueden sacarse directamente de observaciones *in situ*.

Hay una gran variedad de fuentes de aguas subterráneas y problemas de contaminantes que involucran la determinación del estado de las aguas subterráneas y la detección o predicción de cambios en el ambiente de las mismas. Los diseños de redes de monitoreo de agua subterránea más aproximados no permiten una formulación rigurosa de los objetivos del monitoreo, por lo cual fallan en considerar la importancia del proceso de controlar el

movimiento de las aguas subterráneas y la migración de los contaminantes de las mismas.

El propósito del diseño de la red de monitoreo de las aguas subterráneas es permitir la obtención de los datos necesarios para la simulación del flujo de aguas subterráneas con optimización para el estudio de las opciones del monitoreo, así como explorar la capacidad y limitantes de las características del acuífero. La meta es determinar cuales son los parámetros requeridos para la aplicación del modelo, así como también proponer diversas técnicas que permitan su medición aprovechando la infraestructura ya existente, minimizándose la inversión necesaria por parte de las autoridades del COPRED.

Es improbable que con los limitados recursos existentes en la actualidad en nuestro campus, las aproximaciones de una red de medición sean efectivas y eficientes en monitorear el ambiente del subsuelo, por lo cual se proponen el diseño de una red de medición que permita registrar los parámetros requeridos para la implementación de un modelo de simulación, basándose en la experiencia obtenida por la aplicación preliminar de dicho modelo en una zona determinada del campus.

Comenzaremos identificando los parámetros hidrológicos, hidráulicos y geológicos requeridos, destacándose entre ellos el nivel freático en la zona a estudiar, la precipitación, la evaporación, la tasa de infiltración, la geología de la zona y diversas características del suelo como, permeabilidad, porosidad y transmisibilidad.

Se considera fundamental para poder realizar un estudio válido de las aguas subterráneas en una zona determinada conocer la superficie freática de la misma, la cual no es más que el plano imaginario que se genera al unirse todos los puntos de la zona donde se conozca el nivel freático, para lo cual debemos disponer de diversos puntos de medición de nivel, conocidos como pozos de observación. Un pozo de observación es aquel pozo de diámetro menor que el de bombeo, que se construye a cierta distancia con el fin de apreciar las variaciones de nivel del agua en su interior. La profundidad de este pozo es variable y no es necesario que llegue hasta el fondo del acuífero.

Para la ubicación en planta de los mismos, se aplicó la metodología de generación de triángulos, tratando en lo posible de que estos triángulos fueran lo más equiláteros posible, siempre y cuando los posibles puntos de perforación sólo estuvieran ubicados en las zonas verdes (jardines) de la zona de estudio, ya que debemos minimizar el impacto de estos sobre el urbanismo de nuestra universidad.

La frecuencia en el registro o medición del nivel freático en los pozos de observación dependerá de la ubicación y la relación existente entre cada uno de ellos y los pozos de extracción de la zona de estudio, por lo que se

debe destacar que cuanto más cercano se encuentre un pozo de observación de una unidad de bombeo en funcionamiento, la frecuencia en el registro de datos de nivel debe ser menor. Las mediciones de nivel pueden realizarse en intervalos muy variables de tiempo (horaria, diaria, semanal, quincenal, mensual) dependiendo de la necesidad de caracterizar la zona afectada por una unidad de explotación, para cuantificar la influencia de eventos extraordinarios o simplemente para calibrar escenarios diferentes en una misma zona (con y sin bombeo).

Para la determinación de la velocidad y dirección del flujo de las aguas subterráneas en la zona de estudio se propone emplear el uso del método de trazadores, cuya metodología básica de aplicación es bastante sencilla y se basa en introducir una cierta cantidad de trazador en un pozo aguas arriba, y luego se registra el tiempo necesario para que un pulso de trazador alcance un cierto lugar aguas abajo, obteniéndose así la velocidad real. En nuestro caso, se pueden usar sales y/o tintes como los trazadores más convenientes, pero se propone utilizar el cloruro de sodio (NaCl) como trazador, debido en especial a su sencillez de uso y a su bajo costo. Bastante sal se debe agregar para aumentar perceptiblemente la conductividad eléctrica del agua para poder realizar la medición. La cantidad requerida de sal puede ser estimada analizando el agua para la cantidad existente del fondo de sal en el flujo de la medida, estimando la cantidad de flujo que se medirá, y usando datos químicos del manual de las tablas de la conductividad-salinidad.

Para la medición de los parámetros climáticos requeridos para la aplicación del modelo de simulación se cuenta con la estación meteorológica UCV identificada con el número 0538, la cual realiza la medición de una serie de parámetros climáticos cerca de la superficie del suelo. Ella contiene, dentro de una caja con rejillas, termómetros para la medición de temperaturas máxima y mínima del aire cada día, y un termómetro de bulbo seco y mojado llamado higrómetro, para medir la humedad; cerca se localizan los pluviómetros, y una tina o tanque de evaporación. Para la medición detallada de variables climáticas se pueden instalar estaciones especiales en los sitios de muestreo, en las cuales la información puede acumularse y enviarse a través de microondas a una estación de registro central como la existente en la UCV, pero para el caso en estudio, es innecesario la utilización de estaciones especiales, ya que la data existente en la estación UCV es suficientemente representativa para validar su utilización.

Otro factor o parámetro a medir es la cantidad de humedad presente en el suelo, la cual puede determinarse tomando una muestra del mismo y secarlo en un horno. Al comparar el peso del material de muestra antes y después del secado y medir su volumen, se puede deter-

minar el contenido de humedad del suelo. La importancia de realizar la medición de este parámetro en diversos puntos de la zona de estudio radica en la presencia de factores de humedecimiento del suelo, como el uso de aspersores, con los cuales se realiza el riego de los jardines de la Ciudad Universitaria, los cuales son manipulados de manera bastante artesanal en cuanto a los criterios de suministro de agua, lo que genera una posible saturación del suelo, y por ende, un posible aporte a las aguas subterráneas de la zona en cuestión. Se propone realizar la cuantificación de la humedad del suelo en sectores representativos de la zona de estudio, lo que permitirá mejorar la sensibilidad del modelo de simulación a aplicarse en el futuro.

Las mediciones de la infiltración se realizan a través del infiltrómetro de anillo, el cual no es más que un anillo metálico que se entierra en el suelo; se coloca agua dentro del mismo y se registra sus niveles a intervalos regulares de tiempo a medida que el agua se infiltra. Esto permite la construcción de la curva de infiltración acumulada, a partir de la cual se puede calcular la tasa de infiltración como función del tiempo. Al igual que con el parámetro anterior, se propone la medición de la tasa de infiltración

en sectores representativos de la zona de estudio, para que así se cuantifique el aporte generado por esta vía a las aguas subterráneas, recordando que el uso de aspersores para riego de manera no eficiente, sin tomarse en consideración la época del año (lluvia o sequía), puede generar aportes de agua sobrante del riego a las aguas subterráneas.

En una captación de agua subterránea tiene mucha importancia la determinación del coeficiente de permeabilidad, ya que junto al gradiente hidráulico es responsable de la rapidez con que se presenta el fluido a la captación. Existen métodos directos e indirectos para medir la permeabilidad; los métodos indirectos consisten en determinar en el laboratorio la granulometría de las partículas y la porosidad, entre otras exigencias de las fórmulas más o menos empíricas que requieren estos parámetros.

Los ensayos de laboratorio son más económicos que los de campo y útiles en una fase preliminar: se basan en el análisis de muestras tomadas de los acuíferos, y permiten determinar la permeabilidad con un grado de exactitud que poco tiene que ver con la permeabilidad de campo. Esta inexactitud se debe a que: a) la muestra que se extrae del acuífero mediante la perforación, es solamente pun-

Resumen propuesta del plan de mediciones del flujo de las aguas subterráneas en la CUC

Necesidad	Medidas	Observaciones
Medición de nivel freático	Sensores capacitivos con almacenamiento de data	Se propone realizar mediciones de nivel diarias y semanales
Medición de la velocidad y dirección del flujo de aguas subterráneas	Medidores de nivel tipo sonda capacitiva portátil sin almacenamiento de data Empleo de trazadores de sal o de color	Se propone realizar mediciones cuatro veces al año (interestacionales)
Caracterización del suelo	Ensayos de laboratorio que determinen la permeabilidad, tipo de suelo, granulometría, porosidad	Posteriores a la obtención de muestras tomadas durante la construcción de los pozos de observación propuestos
Geología de la zona de estudio	Determinación de la humedad del suelo y la tasa de infiltración Perfiles estratigráficos	Se propone realizar mediciones cuatro veces al año (interestacionales) Efectuados durante la construcción de los pozos propuestos
Estructurales o de mantenimiento de la Red de Pozos de la CUC	Perfiles eléctricos	Efectuados durante la construcción de los pozos propuestos
Variables climáticas	Clausura del pozo de abastecimiento PA-V3 Construcción de cuatro (4) pozos de observación y de abastecimiento	
Calidad del agua	Recuperación física de los pozos de observación y de abastecimiento Medición de la precipitación y la evaporación	Se propone la utilización de los valores promedios de la estación UCV
	Toma de muestras, análisis físico-químicos y bacteriológicos.	Determinación de las características sanitarias y posibilidad de aprovechamiento

Fuente: Obregón, 2004.

tual ante una extensión que es sumamente grande y pudiera ser no representativa de la composición media del acuífero, y b) es casi seguro que al extraer la muestra se producen modificaciones en la colocación, compactación y orientación de las partículas para alterar su porosidad y, consecuentemente, la permeabilidad. Por lo antes expresado y por razones obvias, se debe encomendar a un laboratorio de suelos calificado la recolección de las muestras y la realización de los análisis de laboratorio requeridos para la determinación de las características del suelo que nos interesan como la porosidad (muestras imperturbadas), permeabilidad, granulometría, tipo de suelo, etc.

Evaluación del riesgo por el flujo de agua superficial en la Ciudad Universitaria de Caracas

Bello, López y Courtel (2004) procedieron a realizar un análisis de la Cuenca del río Guaire, que discurre en dirección oeste-este a lo largo del Valle de Caracas, captando las aguas provenientes de numerosas quebradas intermitentes que nacen en la vertiente sur del Ávila y de importantes ríos y quebradas que nacen al sur del valle.

La cuenca del río Guaire tiene un área aproximada de 550 km², la elevación máxima de la cuenca es de 2750 m.s.n.m. en el Pico Naiquatá. El Río Guaire nace en la confluencia de los ríos San Pedro y Macarao en Las Adjuntas; confluyen por su margen derecha las quebradas Caricuao, La Vega, río Valle y quebrada Baruta; mientras que por la margen izquierda confluyen las quebradas Caroata, Catuche, Anauco, Honda, Canoas, Maripérez, Chacaito, Seca, Sebucán, Agua de Maíz, Tócome y Caurimare, las cuales tienen un alto potencial de arrastre.

Desde 1892 se han reportado inundaciones del Valle de Caracas debido al desbordamiento del río Guaire, produciendo daños materiales y en algunas oportunidades la pérdida de vidas humanas, siendo el último reporte en 1980. El objetivo futuro enmarcado en este trabajo es evaluar las potenciales inundaciones en la Ciudad Universitaria de Caracas debido a las crecidas del río Guaire y el río Valle, basándonos en la metodología empleada por los autores anteriormente mencionados.

Para la simulación de inundaciones del río Guaire se procede a un análisis en dos etapas, aplicando sucesivamente dos modelos de flujo, el modelo unidimensional HEC-RAS y el modelo bidimensional FLO-2D.

El modelo HEC-RAS es capaz de simular flujo unidimensional permanente en redes de canales abiertos. Calcula el perfil de agua para régimen permanente gradualmente variado y es capaz de simular flujo subcrítico

co y supercrítico empleado las ecuaciones de Saint Venant en una sola dimensión. Se basa en la solución de la ecuación de energía en una dimensión, adicionalmente emplea la solución de la ecuación de cantidad de movimiento en los casos en que el perfil de agua es rápidamente variado, como por ejemplo resaltos hidráulicos, confluencias y puentes. Asimismo, considera los efectos de obstrucciones debidas a puentes, alcantarillas y vertederos. Este modelo fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USCE).

El FLO-2D simula el flujo de fluidos no-newtonianos en abanicos aluviales. El modelo permite determinar los patrones del flujo en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación de cuerpos de agua, así como el intercambio de fluido entre el canal y la planicie de inundación. El modelo permite considerar flujo de agua y flujo hiperconcentrado de sedimentos, tales como flujo de barro (aludes torrenciales). Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y la planicie de inundación, hidrogramas de entrada y/o lluvia y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento. Este modelo se basa en la solución a través del método de las diferencias finitas de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones verticalmente integradas para fluidos no newtonianos.

Se emplea primero el modelo unidimensional con la finalidad de estimar las profundidades de flujo para los gastos máximos de las crecientes de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno y la mancha de inundación para las distintas crecientes. Los resultados permitirán identificar las zonas críticas, las cuales se analizarán entonces de manera más precisa con el modelo bidimensional. Para facilitar el estudio se puede dividir la canalización en tramos en función de la geometría de la sección y los aportes de los afluentes más importantes. Para estudiar las zonas críticas se emplea el modelo bidimensional FLO-2D, que permite un mayor nivel de detalle de estas áreas y el planteamiento de varios escenarios.

Conclusiones

Se seleccionó la zona circundante al Estadio Olímpico de la UCV como zona de estudio para el modelo de aguas subterráneas, debido a la presencia en sus adyacencias de varios integrantes de la red de pozos de la CUC, recopilándose información geométrica, topográfica y de niveles freáticos necesaria para la aplicación preliminar y simplificada de un modelo de simulación de flujo en medio poroso, con diferentes condiciones de contorno.

Se efectuó la discretización de la zona de estudio seleccionada, definiéndose puntos en la frontera de la misma, ya que el modelo de simulación aplicado se basa en el método de soluciones fundamentales, el cual no requiere la construcción de una malla para la distribución de los puntos y requiere solamente especificar los puntos del contorno sobre los límites del dominio, para posteriormente resolver el sistema de ecuaciones lineales resultantes, que permite diferenciar los comportamientos del flujo en diversas condiciones.

La necesidad de obtención de registros y datos precisos y confiables, de los diversos parámetros requeridos para la simulación del acuífero, se hace manifiesta, en vista de la dificultad existente de realizar proyecciones que se consideren válidas y representativas con los datos actuales.

La posible afectación de las aguas subterráneas sobre las estructuras cercanas a ellas sólo se podrá estudiar después de la aplicación de un modelo de simulación de flujo en medio poroso que permita caracterizar al acuífero en cuestión. Para lo cual se requiere de información hidrológica, hidráulica y geológica válida, específica y actualizada.

El plan de mediciones propuesto no es más que el resultado de la identificación de las carencias en información y datos existentes en la actualidad, las cuales son variables o parámetros que limitan el estudio hidrogeológico del subsuelo de la Ciudad Universitaria de Caracas, y por ende no permiten la correcta caracterización de la zona de estudio y a su vez impiden desarrollar soluciones a las problemática de patología estructural y de vulnerabilidad que presentan las edificaciones existentes en la zona de estudio.

La implementación del plan de mediciones propuesto permitirá obtener los datos necesarios requeridos para la realización de estudios hidrogeológicos y sanitarios, que cuantifiquen la disponibilidad de agua presente en el acuífero, así como su posibilidad de aprovechamiento como una fuente alterna de agua apta para consumo humano.

Persiste la necesidad de completar el análisis del flujo superficial, aplicando la metodología elaborada por Bello, López y Courtel (2004) para la zonas aledañas a los ríos Valle y Guaire, recordando que se debe tomar como referencia los valores obtenidos por estos investigadores y realizando un análisis bidimensional de ser necesario, en nuestra zona de posible riesgo para nuestro patrimonio.

Referencias bibliográficas

- Ayala, L. (1982) *Estudio hidrológico del río Guaire - estado Miranda*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas.
- Bello M. E., López J. L. y Courtel F. (2004) *Impacto y prevención de aludes torrenciales e inundaciones en el Valle de Caracas. Caso: Río Guaire*. Instituto de Mecánica de Fluidos Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Córdova, J. R. (2003) *Estudio hidrológico de la Cuenca del Río Guaire*. C.G.R. Ingeniería, Caracas.
- De Avellán, H. (1977) *Estudio de crecientes en la Cuenca del Río Guaire*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Caracas.
- Ferziger, J. y Peric, M. (1996) *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin.
- Huyakorn, P. y Pinder, G. (1983) *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, New York.
- Johnston, R. y Fairweather, G. (1984) "The Method of Fundamental Solutions for Problems in Potential Flow", *Applied Mathematical Modelling*, 8, 265-270.
- Nava H., Melín (2002) Información y vulnerabilidad para la preservación del patrimonio arquitectónico. Caso de Estudio: Ciudad Universitaria de Caracas. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Obregón M., Víctor (2004) Diseño de un Plan de Mediciones para el Seguimiento del Flujo de las Aguas Subterráneas en la Ciudad Universitaria de Caracas Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Pérez M., José (2004) Suministro de agua para la Ciudad Universitaria. Trabajo no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Saavedra C., Iván I. (2002) Método de soluciones fundamentales mejorado para flujo tridimensional con superficie libre en medio poroso. Tesis Doctoral. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Wiese, R. (1959) Hydrologic for Canilization of Río Guaire (Río Guaire drainage area above Petare, Ministerio de Obras Públicas, Caracas.