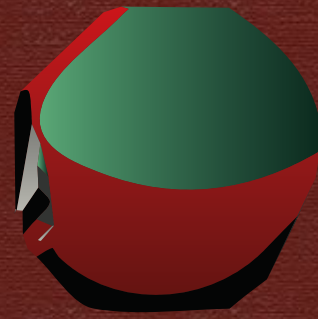


Recibido el 14 de enero de 2023, aceptado el 20 de mayo de 2023.



09

MODELO FÍSICO A ESCALA DE UN POZO DE INFILTRACIÓN

SCALE PHYSICAL MODEL OF A DRYWELL

Rubén Gasca Granados^{1*}
Enrique González Sosa¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

**rgasca@yahoo.com*

RESUMEN

La explosión demográfica está provocando tensión en la disponibilidad de los recursos hídricos, en especial debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas. Además, para preservar la naturaleza, deben implementarse herramientas que garanticen la calidad, abastecimiento y recarga de los mantos acuíferos sin deteriorar el medio ambiente. Sin embargo, la eficacia y funcionalidad de estas herramientas dependen de una amplia variedad de factores; en particular, de las características y propiedades del suelo. Con todo lo anterior en cuenta, este trabajo presenta la metodología llevada a cabo para la puesta a punto del modelo físico a escala de un pozo de absorción, con el fin de dilucidar el proceso de infiltración y mejorar su funcionamiento en condiciones de flujo permanente. Se efectuaron pruebas en condiciones estáticas y de flujo permanente, con y sin suelo, mediante 15 sensores centralizados que se adaptaron a una tarjeta Arduino Mega. Los transductores se calibraron de forma hidrostática, su comportamiento fue propicio y se ajustó con regresión lineal. También se efectuaron tres pruebas en flujo permanente (arena, arena-arcilla, y arcilla-arena), y se observó que los sensores respondían de acuerdo con lo esperado (comportamiento lineal) en todas las pruebas. En resumen, el modelo a escala representa adecuadamente un pozo de infiltración.

La sobreexplotación de recursos como el hídrico han afectado la integridad de la naturaleza. Las herramientas propuestas para contrarrestar el deterioro de los mantos acuíferos presentan fallas debido a la irregularidad del suelo. El modelo de este trabajo busca mejorar el funcionamiento del proceso de infiltración en los pozos de absorción.

Palabras clave: hidrología, modelo a escala, pozo de infiltración, recarga artificial.

ABSTRACT

The population explosion is causing stress on the availability of water resources, especially due to the overexploitation of groundwater. Moreover, in order to preserve nature, tools must be implemented to ensure the quality, supply and recharge of aquifers without deteriorating the environment. However, the effectiveness and functionality of these tools depends on a wide variety of factors; in particular, on the characteristics and properties of the soil. With all of the above in mind, this paper presents the methodology carried out for the development of a physical scale model of an absorption well in order to elucidate the infiltration process and improve its performance under permanent flow conditions. Tests were conducted under static and steady flow conditions, without soil and with soil, using 15 centralized sensors that were adapted to an Arduino Mega board. The transducers were hydrostatically calibrated, their behavior was linear and fitted with linear regression. Three tests were performed in steady flow (sand, sand-clay, and clay-sand), and the sensors were observed to respond as expected (linear behavior) in all tests. In summary, the scale model adequately represents an infiltration well.

Keywords: hydrology, artificial recharge, drywell, scale model.

INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia garantizar la disponibilidad del agua de manera sostenible, por lo que se requiere un manejo integral de este recurso. El crecimiento acelerado de la población está provocando tensión en la asignación de recursos



hídricos; por ejemplo, existe una preocupante sobreexplotación de las aguas subterráneas en algunas zonas [1]. Tal abuso comienza a causar problemas de subducción, debidos a la disminución en la presión de poro, ocasionado asentamientos o grietas, según la litología del sitio donde se localice el acuífero en cuestión. Por tanto, para fomentar la recuperación de la naturaleza es imperativo incrementar la cantidad de agua que se infiltra hacia los acuíferos, siempre y cuando se garantice su calidad, así como la protección de las fuentes de abastecimiento sin deteriorar el medio ambiente [2].

El interés en la recarga de acuíferos nace al inicio del siglo **XX**, en California y Nueva York, debido a la sobreexplotación de los mantos. La recarga artificial (**RA**), también conocida como **MAR** (*Managed Aquifer Recharge*) consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas, pozos de infiltración o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza los mantos acuíferos. La técnica ha gozado de una creciente aceptación para almacenar agua a corto o largo plazo, ya que presenta múltiples ventajas con respecto al almacenamiento en superficie [3]. En México se encuentran normalizadas la construcción, operación, mantenimiento y cierre de mecanismos de **RA** (Normas Oficiales Mexicanas **NOM-015-CONAGUA-2007**, *Recarga artificial de agua a los acuíferos, características y especificaciones de las obras y del agua*) [4]. Sin embargo, la eficacia y funcionalidad dependen principalmente de las características y propiedades del suelo. A partir de su desarrollo en los años **20** en Estados Unidos, los pozos de inyección o recarga se utilizaron para recuperar humedales para la agricultura y fueron exitosos en

zonas de gran porosidad como las calizas de Florida y los depósitos basálticos altamente fracturados [5]; por desgracia, los primeros diseños llegaron a presentar inconvenientes de bloqueo y contaminación debido a la acumulación de sedimentos transportados a lo largo de los pozos, como también a la proliferación de algas y bacterias.

Entre los primeros intentos de recarga se encuentra el llevado a cabo en **1954** por la Universidad de Arkansas; consistía en una recarga horizontal en el fondo del pozo a través de un sistema de tuberías perforadas en forma radial, dispuesto como una rueda de bicicleta. Desde el punto de vista experimental, [6] analizaron el comportamiento temporal en la interacción del acuífero con los filtros para la recarga, en específico, la permeabilidad en términos del gradiente hidráulico desde que inicia la recarga. Como era de esperar, encontraron que existe una oscilación entre la recarga y un flujo inverso que resulta del taponamiento y la compactación del filtro.

No obstante, el estudio de los pozos de infiltración no se ha ocupado en hacer modelos físicos para ver el comportamiento del flujo y de las presiones a lo largo de los pozos. Es cierto que varios investigadores han realizado pruebas de campo [1, 7], pero pocos han construido modelos en laboratorio, ya que los suelos son heterogéneos y anisotrópicos. El tipo de estructura que se utiliza para la recarga está condicionada si la fuente de abastecimiento es superficial o profunda; por ese motivo, los pozos son los más utilizados en pequeñas comunidades para satisfacer las demandas de agua [8]. En este trabajo se describe la

puesta en operación de un modelo físico a escala de un pozo de infiltración desarrollado para esclarecer el proceso de infiltración en condiciones de flujo permanente y medios heterogéneos verticales.

MÉTODOS, MATERIALES Y DATOS

El concepto de modelo físico se refiere a una analogía experimental: “[...] cualquier representación de un fenómeno físico a escala reducida, sustentada en leyes de similitud, de manera que los resultados obtenidos pueden ser interpretados con la menor incertidumbre posible y buena precisión” [9]. La representación del pozo de infiltración considera dónde el comportamiento del flujo a través del suelo es observable, y define los puntos donde medir las presiones en diferentes alturas y observar el avance de la humedad. Asimismo, existen trabajos experimentales que han dado seguimiento a la funcionalidad de los pozos de recarga (Figura 1).

En ellos, se establecen en forma general los mecanismos hidrodinámicos del proceso:

- Formación y expansión del bulbo de infiltración,
- abultamiento de la superficie piezométrica,
- recarga en estado permanente,
- desaparición del abultamiento de la carga hidráulica una vez que el agua se ha infiltrado.

El frente de humedad está restringido por la porosidad del suelo. Cuando pasa entre los poros más pequeños, el flujo es de baja velocidad y el contenido de agua disminuye. A su vez, el flujo está sujeto al contenido de agua, gradiente de potencial de matriz

(potencial capilar), y potencial gravitatorio con base en la siguiente relación:

$$q = -k \left(\frac{d(h-z)}{dz} \right) \quad (1)$$

Donde

h: cambio de altura del agua respecto a la horizontal (m).

q = Q/A: caudal que circula por unidad de área (m³/s).

k: conductividad hidráulica (m/s).

d(h-z)/dz: gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales.

El signo negativo de k se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección decreciente es hacia los d(h-z), es decir, Δh o d(h-z) es negativo y, por tanto, el caudal será positivo.

Dentro de las zonas saturadas, el flujo se mueve por una carga hidráulica positiva; por el contrario, en la zona no saturada se debe generalmente a un gradiente negativo [3]. Entonces, el avance del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico, conocido como *conductividad hidráulica* (k) o *coeficiente de permeabilidad* [10]. Sin embargo, los pozos de recarga (infiltración o absorción) responden físicamente en función de las capas que atraviesan; además, contienen un filtro de arena gruesa o grava fina. De esta forma, el flujo circula por una tubería perforada o con malla en el centro.

Con todo, estas condiciones requieren más investigación porque, mientras que por un lado, el medio no es heterogéneo; por el otro, es importante mejorar el conocimiento de las interacciones entre las zonas no saturada y saturada, para adaptar optimamente la teoría que describe el funcionamiento de los pozos de recarga.

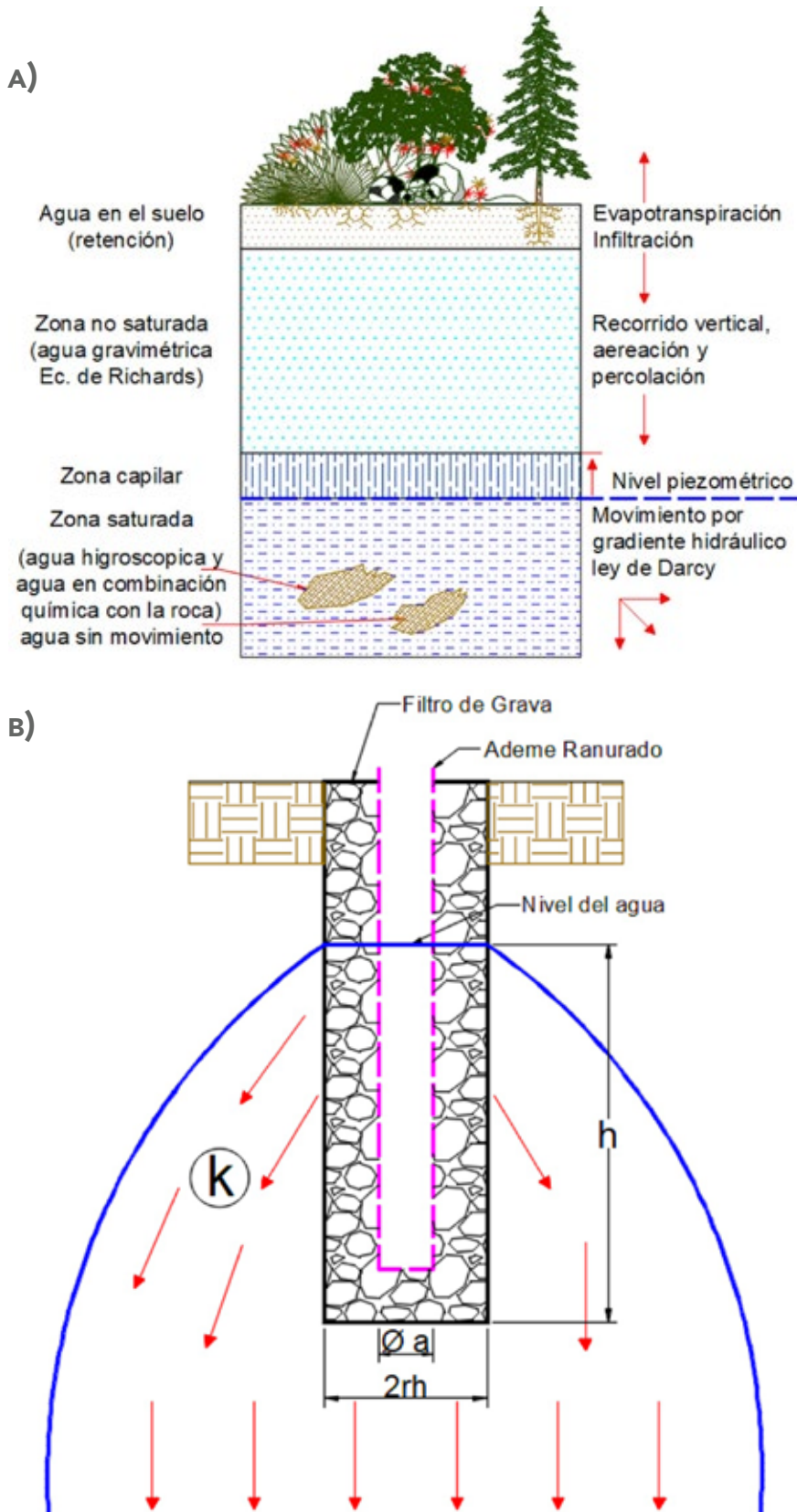


Figura 1. Esquema típico de movimiento del agua en el suelo y de un pozo de recarga artificial de frente de humedecimiento teórico en medio homogéneo.
 a) Movimiento del agua en el suelo. b) Pozo con ranura y filtro.
 k: permeabilidad; h: carga hidráulica; rh: radio del pozo.
 Fuente: Basado en [3].

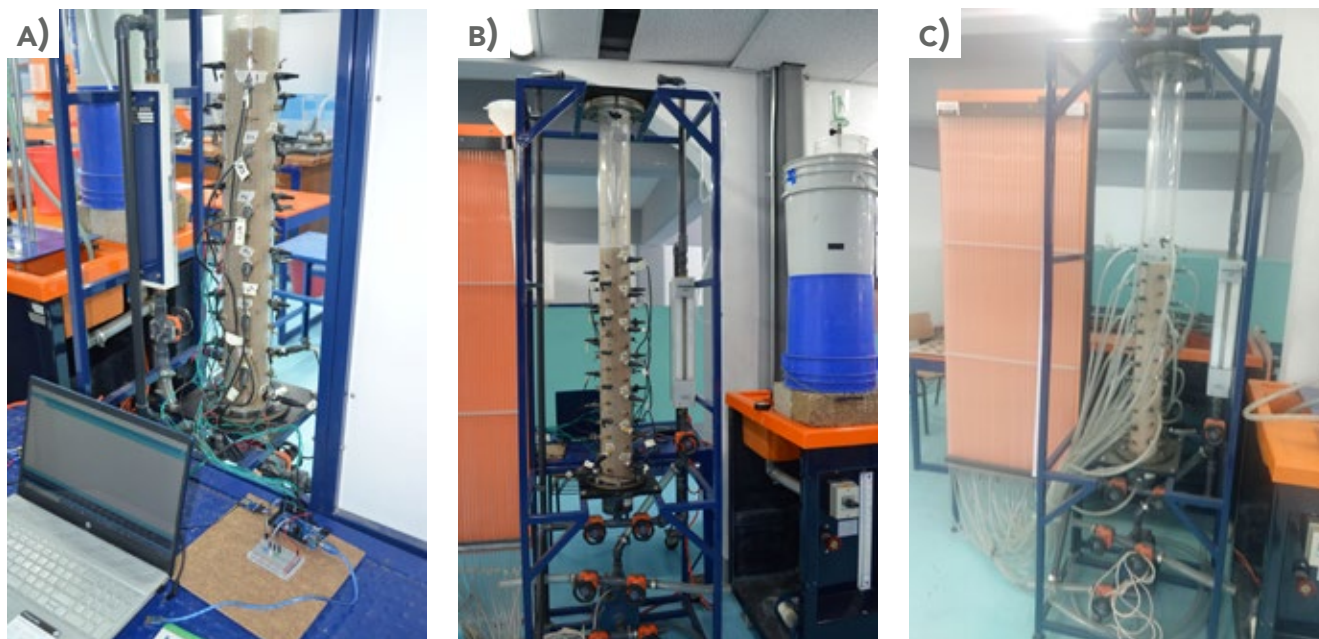


Figura 2. Foto del equipo de Columna de Filtración con Lecho Profundo Armfield-W5-MkII-A, ubicado en el laboratorio de fluidos de la UAQ. A) Condiciones iniciales, conectados con piezómetros de manguera. B) Prueba hidrostática. C) Prueba con un estrato (arena).

LEYES DE SIMILITUD

Existen tres leyes que rigen la parte experimental de modelos a escala en mecánica de fluidos, a fin de que estos sean válidos para respaldar las hipótesis y los resultados de estudio de un modelo físico: geométrica, cinemática y dinámica. En el caso del pozo de recarga, el modelo físico cuenta con una escala geométrica de 1:50; por su parte, la escala cinemática corresponde a 1:1 (Rreal=Rmodelo), debido a que los efectos de la viscosidad son independientes de la geometría, siempre y cuando la relación sea menor que 1:100. Por último, se considera que la similitud dinámica se conserva porque depende de las dos anteriores [11].

MODELO FÍSICO

El modelo está constituido por un tubo de acrílico transparente de 10.4 cm de diámetro interno y 1.35 m de altura. Se acoplaron bridas en un extremo y se perforaron orificios a cada 4 cm en 6 colum-

nas dispuestas a cada 60° sobre la circunferencia de la sección transversal del tubo, iniciando a la altura de 2 cm hasta 78 cm de profundidad. Además, el conducto se adaptó para colocar transductores de presión en lugar de piezómetros. En su parte central se instaló un conducto ranurado de acrílico de diámetro 7 mm, y se añadió una cubierta de tela para simular un filtro de grava que permitiera el flujo de agua. Dicha corriente en estado permanente se simuló mediante un sifón con una manguera transparente de 1/4" conectada a un contenedor plástico de 19 litros, en el cual la carga se mantuvo constante.

Se adaptaron 15 sensores de presión piezoresistivos (Figura 2) centralizados a la tarjeta Arduino Mega, cuya función es transformar las señales analógicas a digitales y almacenarlas en una unidad de memoria microSD; la fuente de alimentación del arreglo fue un generador de corriente continua de 5 V a 2 A. De esta forma se monitoreó la señal del

avance del flujo y se agilizó su registro para periodos del orden de milisegundos acerca de la respuesta del suelo en condiciones de flujo permanente.

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los transductores de presión piezoresistivos se componen de una membrana de silicio y cuentan con galgas extensométricas, que detectan las deformaciones por presiones aplicadas. Al formar un puente de Wheatstone, las galgas extensométricas reducen la sensibilidad y aumentan la potencia de salida del instrumento. Se ajustaron de la siguiente manera: 10 sensores de 0-30 psi, 3 de 0-10 psi, y 2 de 0-5 psi. Cada uno con las siguientes características:

- Cuerpo de acero inoxidable,
- voltaje: 5 v cc,
- tipo de rosca: 1/8" NPT,
- salida: voltaje lineal de 0.5 v ~ 4.5 v (0 psi = 0.5 v, 15 psi = 2.5 v, 30 psi = 4.5 v) ,
- precisión: dentro del 2 % de la lectura (escala completa).

La tarjeta Arduino Mega ATmega2560 posee pines de entradas y salidas (E/S) analógicas y digitales; programada en un entorno de lenguaje Processing/Wiring, se comunica a una PC a través del puerto serial (conversión con USB) utilizando lenguajes como Flash, Processing, MaxMSP, etc. Contiene un microcontrolador ATmega2560 y posee 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 receptores/transmisores asíncronos universales, un cristal de 16 Mz, conexión USB, entrada para alimentación de corriente continua, conector ICSP, y un botón de reseteo. El lenguaje nativo de Arduino para programación de alto nivel se basa en Processing, una variante simplificada de C++, y comparte similitudes con otros lenguajes. Para garantizar la

funcionalidad, y sensibilidad del sistema, fueron realizadas pruebas de calibración en condiciones controladas, las cuales se describen en el apartado siguiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CALIBRACIÓN DE CARGA Y PRESIÓN HIDRÁULICA ESTÁTICA

La condición estática se refiere a que la carga es constante en el tiempo. Sin embargo, la presión hidráulica es linealmente creciente: aumenta con la profundidad de acuerdo a la ley de Pascal [11]. La calibración de los transductores de presión hidrostática se efectuó llenando el cilindro de acrílico hasta las alturas de los sensores, en este caso: 110, 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 y 0 cm; se restó el efecto

de la altura en cada sensor para precisar su carga hidrostática (Figura 3), y los valores de la presión se midieron en mV.

A partir de la comparación gráfica con la distribución de presión teórica, las registradas en diferentes lapsos de tiempo fueron ajustadas mediante una regresión lineal para determinar el factor de corrección. Una vez que las presiones teórica y real fueron similares, las ecuaciones se integraron al programa en la tarjeta Arduino, a fin de obtener directamente el valor de la carga durante los experimentos. Aunque las lecturas de presión pueden registrarse con exactitud de milisegundos, se realizaron en periodos de 20 segundos para disponer de información sobre la dinámica de la presión asociada al frente del flujo mientras se evitaba la saturación de la memoria de la tarjeta (Figura 4).

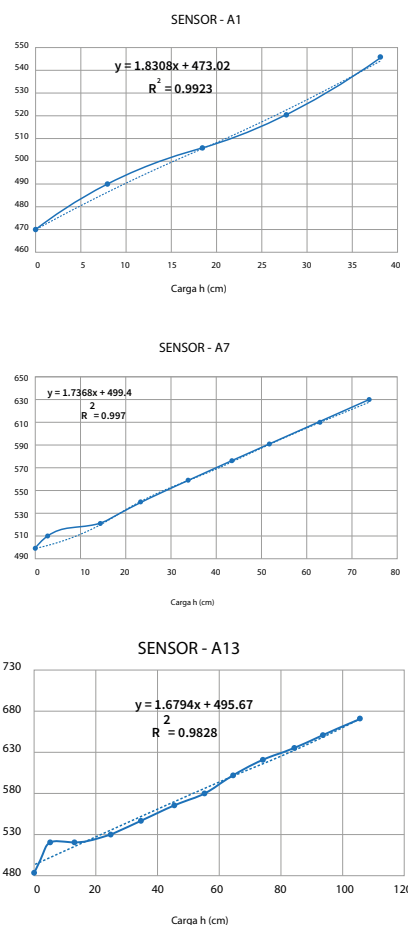
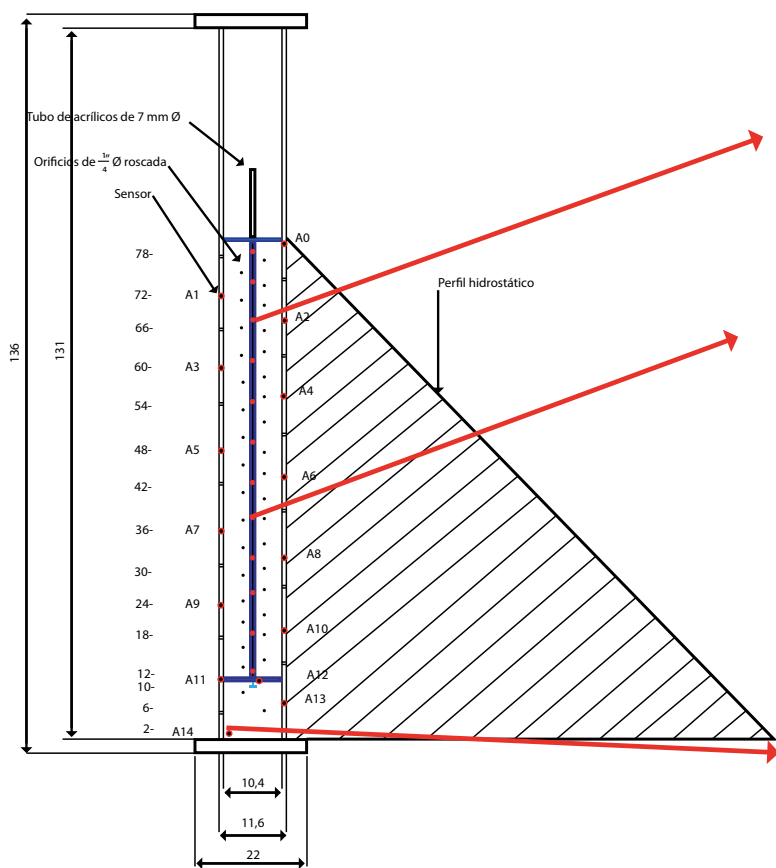


Figura 3. Disposición del modelo físico para la calibración de los sensores en estado hidrostático. Izquierda: esquema del modelo con la ubicación de los sensores con su perfil de presiones. Derecha: ejemplos de la calibración de sensores A1, A7 y A14 con la regresión lineal.

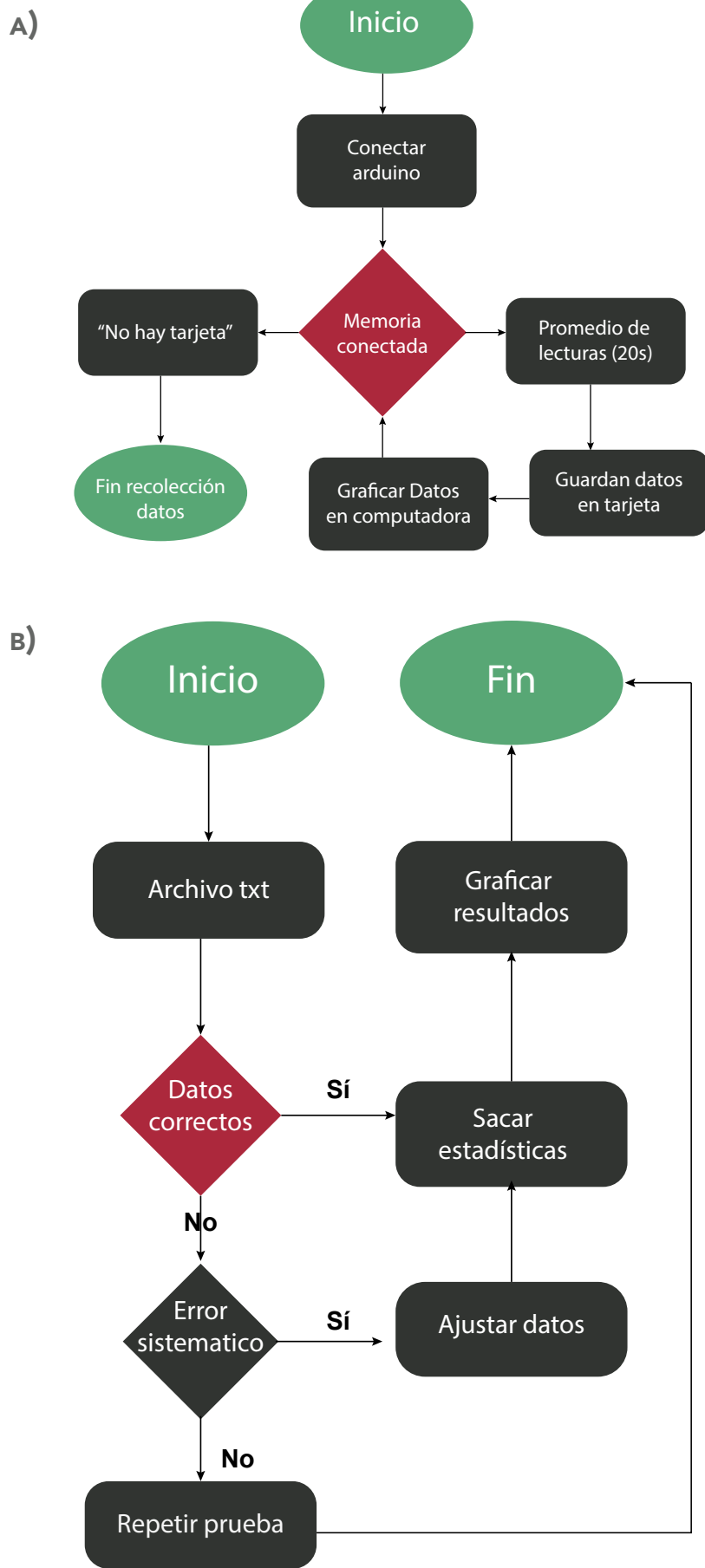


Figura 4. A) Esquema del sistema de adquisición de datos. B) Procesamiento de información obtenida por el Arduino.

CALIBRACIÓN BAJO FLUJO PERMANENTE

Para este caso fueron consideradas combinaciones de suelo: alta permeabilidad (arena) en la parte superior de la columna y baja (suelo franco arcilloso) en la inferior, y viceversa. Se agregó material desde los diez primeros centímetros en la parte baja hasta los 80 cm. La

permeabilidad de los diferentes tipos de suelo utilizados para la calibración fue determinada previamente con la textura del material. El flujo permanente se estableció al alimentar el tubo ranurado de acrílico colocado en el centro del pozo: y para garantizar el nivel constante se empleó un sifón. Se tomaron las lecturas desde el inicio de la operación del sifón hasta que

se estabilizaron; posteriormente se guardaron las lecturas en la tarjeta de memoria y se procesaron los datos. Las observaciones mostraron que, a pesar de que el flujo es permanente, la presión aumenta al descender hasta los dos tercios de altura y después decae; es decir, se cumple la ley de conservación de la energía (Figura 5).

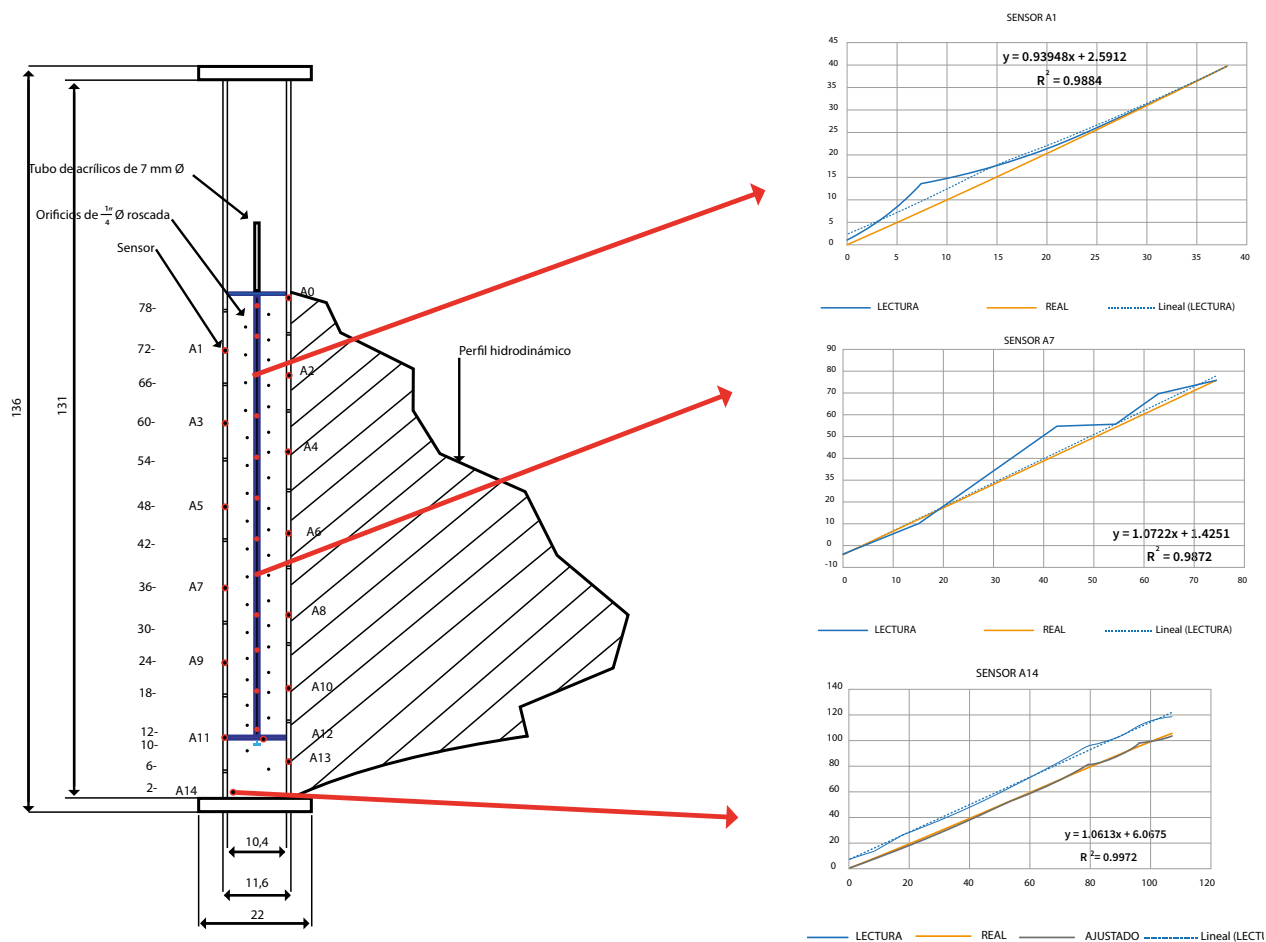


Figura 5. Disposición del modelo físico para la calibración de los sensores piezométricos en estado hidrodinámico y el sistema de adquisición de datos. Izquierda: esquema del modelo con la ubicación de los sensores con su perfil de presiones. Derecha: ejemplos de la calibración de sensores A1, A7 y A14 con su regresión lineal.

CONCLUSIONES

El modelo físico ayuda a visualizar y comprender los procesos involucrados en el frente del flujo. En ese sentido, se confirma que las leyes de similitud son de vital importancia, puesto que permiten diseñar y construir un modelo a escala que respalde las hipótesis

iniciales. En otros factores, la calibración de los transductores de presión es otro aspecto fundamental, porque permitió validar la confiabilidad en la medición del proceso de infiltración inducido por el pozo de recarga para su transformación de escala proceso a natural. Del mismo modo, se confirma la confiabilidad de los dispositivos de

medición de presión, al igual que su pertinencia para el análisis de los productos de la investigación y la comparación de resultados de los modelos matemáticos.

Un área de mejora corresponde a la automatización del flujo para medir la conservación de masa; en este estudio el proceso se



ejecutó en forma manual, pero convendría mejorar el sistema de adquisición de datos mediante la reducción del error humano. En este tenor, también sería adecuado llevar a cabo experimentos para el caso de flujo no permanente. Asimismo, aunque no constituye una limitante, es preferible disponer de sensores de mayor resolución para aminorar las incertidumbres. En esta ocasión no se realizó por falta de recursos y tiempo. Por último, el modelo físico solo ha examinado acuíferos libres, con profundidades del nivel estático de 30 a 100 m, de uno o varios estratos; no obstante, con unas cuantas modificaciones se puede adecuar a otros tipos de acuíferos y condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría expresar nuestra gratitud a un grupo de personas que nos apoyaron a realizar este trabajo, especialmente a Juan Ivan Silva Arellano, por su ayuda en la configuración de los sensores y tarjeta, al personal académico de Hidrología Ambiental, al personal del laboratorio de fluidos de la Facultad de Ingeniería de la UAQ y, desde luego, a la propia UAQ.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Protección Civil del DF - CDMX., "Situación Sísmica: México en el entorno de la sismicidad mundial" <http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/simulacros/CDMX/Situacionsismica.html#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20uno%20de%20los,se%20registran%20en%20el%20mundo>. (Consultado el 22 de mayo de 2022).
- [2] Servicio Geológico Mexicano, "Sismología de México." <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgosgeologicos/Sismologia-de-Mexico.html>. (Consultado el 1 de agosto de 2022).
- [3] Universidad Nacional Autónoma de México. Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, "Sismos Recientes". [En línea] Disponible en: <http://www.ssn.unam.mx> (consultado el 20 de marzo de 2022).
- [4] A. Gómez-Tuena, M. T. Orozco-Esquivel, y L. Ferrari, "Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 57, no. 3. pp. 227-283, 2005. doi: 10.18268/bsgm2005v57n3a2.
- [5] H. Cruz-Jiménez, F. J. Chávez-García y T. Furumura, "Differences in attenuation of ground motion perpendicular to the Mexican subduction zone between Colima and Guerrero: An explanation based on numerical modeling", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 99, no. 1. pp. 400-406, 2009. doi: 10.1785/0120080167.
- [6] N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Paul, S. K. Singh, D. Jongmans y F. J. Sánchez-Sesma, "Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico", *Geophysical Journal International*, vol. 128, no. 1. pp. 151-166, 1997. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb04076.x.
- [7] A. Clemente Chávez, "Relación De Atenuación Del Movimiento Del Suelo Para La Aceleración Máxima (PGA) Sobre El Cinturón Volcánico Mexicano (MVB); Análisis Por Trayectoria", *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 93, no. 87. pp. 67-93, 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.smis.org.mx/rsmis/n87/index.html>
- [8] P. Sánchez López, A. Clemente Chávez y A. Figueroa Soto, "Seismic attenuation in Mexico: Interplate seismicity and its behavior on the Mexican Volcanic Belt (MVB)", *Memorias del XVIII Int. Eng. Congr.*, 2022.
- [9] S. Ordaz, J. M. Jara y S. K. Singh, "Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero", *VIII Congreso Nacional Ingeniería Sísmica*, pp. 40-56, 1989.
- [10] D. García, "Estimación de parámetros de movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en Mexico central", Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2007.
- [11] A. Clemente-Chavez et al., "On the behavior of site effects in central Mexico (the Mexican volcanic belt - MVB), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 6. pp. 1391-1406, 2014. doi: 10.5194/nhess-14-1391-2014.
- [12] J. Lermo y F. J. Chavez-Garcia, "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bulletin - Seismological Society of America*, vol. 83, no. 5. pp. 1574-1594, 1993. doi: 10.1785/bssa0830051574.
- [13] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *Reporte trimestral del Railway Technical Research Institute, Japan*, vol. 30. 1989.
- [14] A. Figueroa Soto, A. Clemente Chávez y F. R. Zúñiga, "Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instala-

do en el campus Juriquilla de la UNAM", *Boletín del Centro de Geociencias UNAM*, no. 1. pp. 1-9, 2010. [En línea] Disponible en: http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/ruido_sismico.pdfdigitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM". Bol-e (Órgano de Comunicación electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM), vol. 6, no.1, 2010.