

# Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

## Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso

## Calculation of hydraulic conductivity from a lithological study in the Aguascalientes Valley, Mexico and comparison of the performance of the underground model with its use

Roxana Nichte-Ha Hughes Lomelin, Marco Antonio Martínez Cinco\*, Sonia Tatiana Sánchez Quispe, Joel Hernández Bedolla

**Para citar este artículo:** Hughes Lomelin RN, Martínez Cinco MA, Sánchez Quispe ST, y Hernández Bedolla J (2024). Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso. *Ciencia Nicolaita* 90: 17-28.  
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.780>

### Historial del artículo



Recibido: 8 de diciembre de 2023  
Aceptado: 28 de febrero de 2024  
Publicado en línea: abril 2024



**Ver material suplementario**



**\*Correspondencia de autor:** [marco.martinez@umich.mx](mailto:marco.martinez@umich.mx)



**Términos y condiciones de uso:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



**Envíe su manuscrito a esta revista:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Cálculo de la conductividad hidráulica a partir de un estudio litológico en el Valle de Aguascalientes, México y comparativa del rendimiento del modelo subterráneo con su uso

## Calculation of hydraulic conductivity from a lithological study in the Aguascalientes Valley, Mexico and comparison of the performance of the underground model with its use

Roxana Nichte-Ha Hughes-Lomelín<sup>a</sup>, Marco Antonio Martínez Cinco<sup>b\*</sup>, Sonia Tatiana Sánchez Quispe<sup>c</sup>, Joel Hernández Bedolla<sup>d</sup>

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, <sup>a</sup>2147703@umich.mx, ORCID: 0009-0000-0406-0826; <sup>b</sup>marco.martinez@umich.mx, ORCID: 0000-0001-8931-4169; <sup>c</sup>quispe@umich.mx, ORCID: 0000-0002-8394-495X; <sup>d</sup>joel.hernandez@umich.mx, ORCID: 0000-0002-8797-518X

### Resumen

En este trabajo se comparan los rendimientos de los modelos subterráneos del acuífero Valle de Aguascalientes, México realizados en MODFLOW utilizando conductividades hidráulicas ( $K_h$ ) equivalentes, determinadas a partir de estudios litológicos, y  $K_h$  supuestas. Se configuró y se calibró el modelo, y se calcularon y compararon los índices de calidad de ajuste para cada simulación, así como los niveles piezométricos del acuífero. Se encontró que el rendimiento global del modelo utilizando  $K_h$  equivalentes es mejor que el modelo utilizando  $K_h$  supuestas, tanto en la distribución espacial de flujos como en los índices, por lo que invertir trabajo previo en la determinación de parámetros da como resultado modelos más robustos.

**Palabras clave:** Conductividad hidráulica, aguas subterráneas, MODFLOW, Aguascalientes

## Abstract

In this work, two groundwater MODFLOW models of the Aguascalientes Valley aquifer in Mexico, one using equivalent hydraulic conductivities ( $K_h$ ) based on lithologic reports, and another using assumed  $K_h$ , are compared. The models were configured and calibrated, and the model performance evaluation statistics were obtained for each simulation and compared. A visual comparison of head levels in the aquifer was carried out as well. The global performance of the model using equivalent  $K_h$  was better than the model using assumed  $K_h$ , both in the spatial distribution of flows and in the evaluation statistics; therefore, investing previous work in determining parameters results in more robust models.

**Keywords:** Hydraulic conductivity, groundwater, MODFLOW, Aguascalientes

## Introducción

El agua subterránea es una fuente esencial de agua para consumo humano debido a su calidad (generalmente buena) y frecuencia de ocurrencia. Es necesario evaluar los planes propuestos de gestión de este recurso y comprender cómo diferentes fenómenos pueden afectar su calidad y cantidad, por ejemplo, la extracción intensiva de acuíferos. Esta evaluación requiere el entendimiento del comportamiento de los sistemas hidrogeológicos, además de la cuantificación de su flujo, para poder observar la respuesta del sistema ante cambios en diferentes factores hidrológicos e hidrogeológicos (Ehtiat *et al.*, 2018). Para esto, es factible apoyarse en el modelado matemático.

El modelado matemático es una herramienta versátil y de suma utilidad en el estudio de la hidrogeología, dado que permite la manipulación de ciertos parámetros para observar su impacto en diferentes fenómenos de interés y ayuda a reducir la incertidumbre al tomar decisiones en la gestión integral de los recursos hídricos.

Uno de los modelos matemáticos utilizados más comúnmente para la simulación de flujo subterráneo es el MODFLOW (Harbaugh, 2005) debido a su facilidad de comprensión y modificación, y su sencillez de uso, además de su bajo impacto en recursos computacionales. MODFLOW es un modelo modular (sus funciones se encuentran en “paquetes”), y aproxima las soluciones a la ecuación diferencial parcial que describe el movimiento tridimensional de un flujo de densidad constante a través de un medio poroso usando el método de diferencias finitas, a partir de una malla tridimensional conformada por celdas.

Un parámetro indispensable en el modelo subterráneo es la conductividad hidráulica, que indica en general la capacidad de un medio para transmitir agua. Este parámetro depende en gran medida del material del cual está conformado el medio que contiene el agua, pero es difícil de cuantificar sin estudios litográficos que describan la composición geológica del acuífero en cuestión. En estos medios estratificados, se produce el flujo a través de varias capas distintas. No obstante, para simplificar el sistema, se recurre a determinar el flujo global en el conjunto de capas, por lo que se considera que el sistema se conforma por una capa única homogénea, en la cual se asigna una conductividad hidráulica equivalente (Sánchez San Román, 2022). Sin embargo, en ocasiones es necesario realizar supuestos para el valor de este parámetro por falta de información.

El objetivo del presente trabajo es comparar los rendimientos de los modelos generados en MODFLOW del acuífero Valle de Aguascalientes, uno utilizando conductividades hidráulicas horizontales equivalentes obtenidas a partir de perfiles litológicos disponibles de la zona, y otro suponiendo una conductividad hidráulica horizontal constante basado en el informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), para verificar el valor de invertir trabajo previo en la determinación de este parámetro.

## Materiales y métodos

### *Descripción de la zona de estudio*

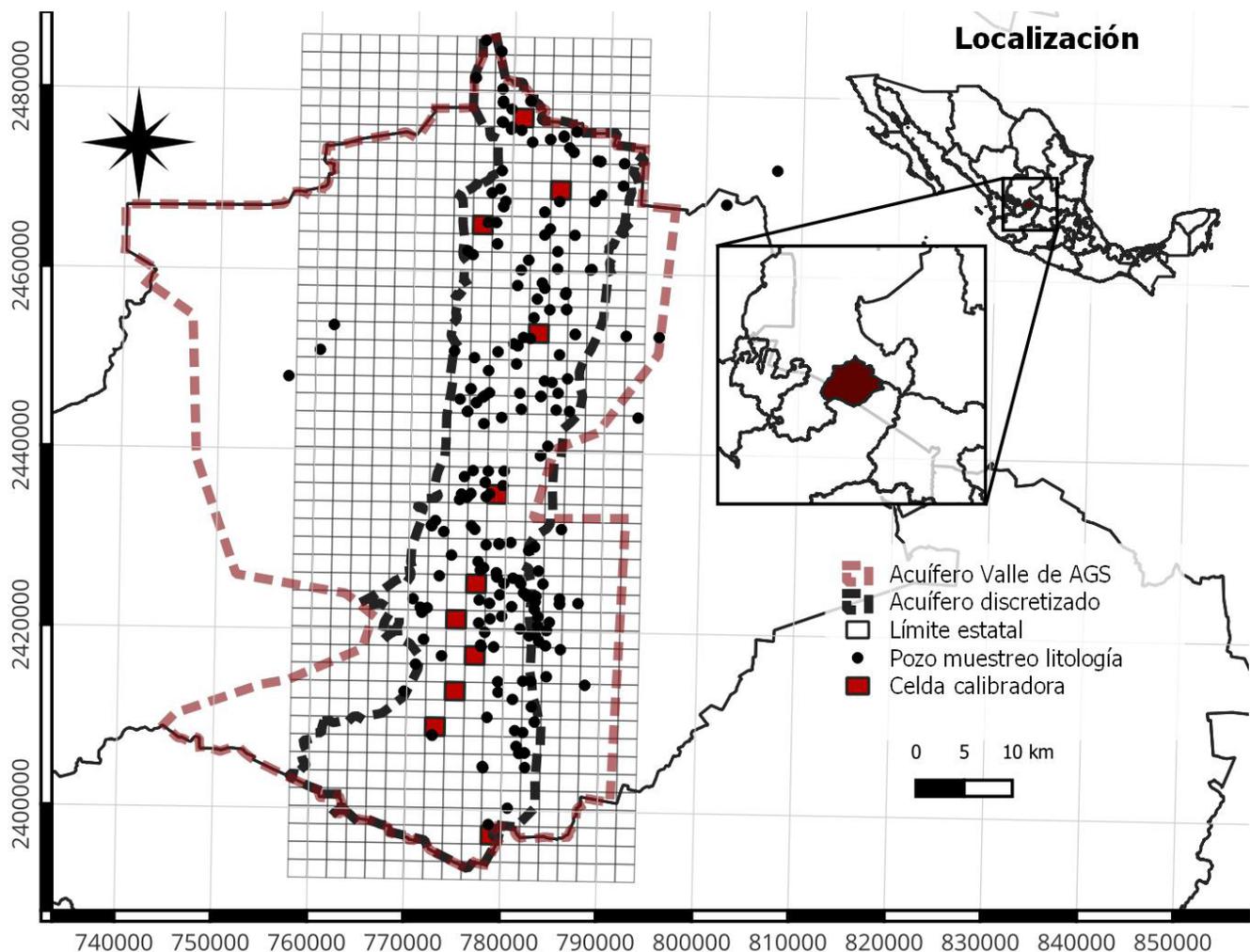
El Valle de Aguascalientes es uno de los 653 acuíferos administrativos de México, ubicado en el

estado de Aguascalientes (**Figura 1**). Este acuífero provee hasta el 94% de la demanda total de agua potable del estado (Hernández-Marín *et al.*, 2018), ya que el clima semiárido de la región resulta en pocas fuentes naturales de agua superficial.

En el Valle de Aguascalientes se ubica la ciudad de Aguascalientes, capital del estado, además de varios centros urbanos importantes. El estado tiene una población de cerca de 1.5 millones de habitantes, de los cuales aproximadamente el 60% vive en la capital (INEGI, 2021). El 95% de las actividades económicas del estado se concentran en el Valle (Sainz-Santamaria y Martínez-Cruz, 2019), entre las cuales se encuentra la agricultura y la industria automotriz.

El sistema hidrogeológico se define como libre, pero exhibe comportamientos hidráulicos

propios de semiconfinamiento en algunas zonas (Hernández-Marín *et al.*, 2018). Tiene una extensión de 3129 km<sup>2</sup>. El flujo predominante es de norte a sur, confirmado por datos de la CONAGUA (2020). Desafortunadamente, los niveles de agua en el acuífero han ido decreciendo considerablemente en las últimas décadas, dada la extracción intensiva requerida para solventar la demanda creciente de recursos hídricos para usos agrícolas, municipales e industriales (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). Por la ubicación de datos disponibles para medición de niveles piezométricos, fue necesario realizar una discretización del área del acuífero, delimitándolo a una sección en el Graben de Aguascalientes (**Figura 1**). Esta discretización está basada en trabajos realizados en el acuífero Valle de Aguascalientes (Guerrero Martínez 2016,



**Figura 1.** Ubicación del acuífero Valle de Aguascalientes (coordenadas UTM 13N en m). Se señalan también la ubicación de los pozos con información litológica y las celdas calibradoras con respecto a la cuadrícula utilizada en la configuración del modelo.

2020; CONAGUA 2020).

La metodología seguida en el presente trabajo se resume en la **Figura 2**.

### **Configuración del modelo subterráneo**

La geometría del modelo realizado en MODFLOW con el programa de ModelMuse (Winston, 2022) se compone de una malla de 828 celdas de 2 km x 2 km, arregladas en 46 renglones x 18 columnas. De estas 828 celdas, 335 se consideraron como “celdas activas”; esto le indica a MODFLOW por dónde pasa el flujo subterráneo (**Figura 3a**).

El modelo del acuífero tiene un espesor variable, de 300 m al poniente a 450 m al oriente, conforme lo encontrado en la literatura (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013), y se consideró como una sola capa homogénea.

El modelo se simuló en estado transitorio, con unidad de tiempo en años, durante un periodo de 29 años, empezando en 1985 y terminando en 2014.

Se asignó un valor específico para cada parámetro hidrodinámico requerido por el modelo a cada celda activa que lo conforma. Estos parámetros corresponden a:

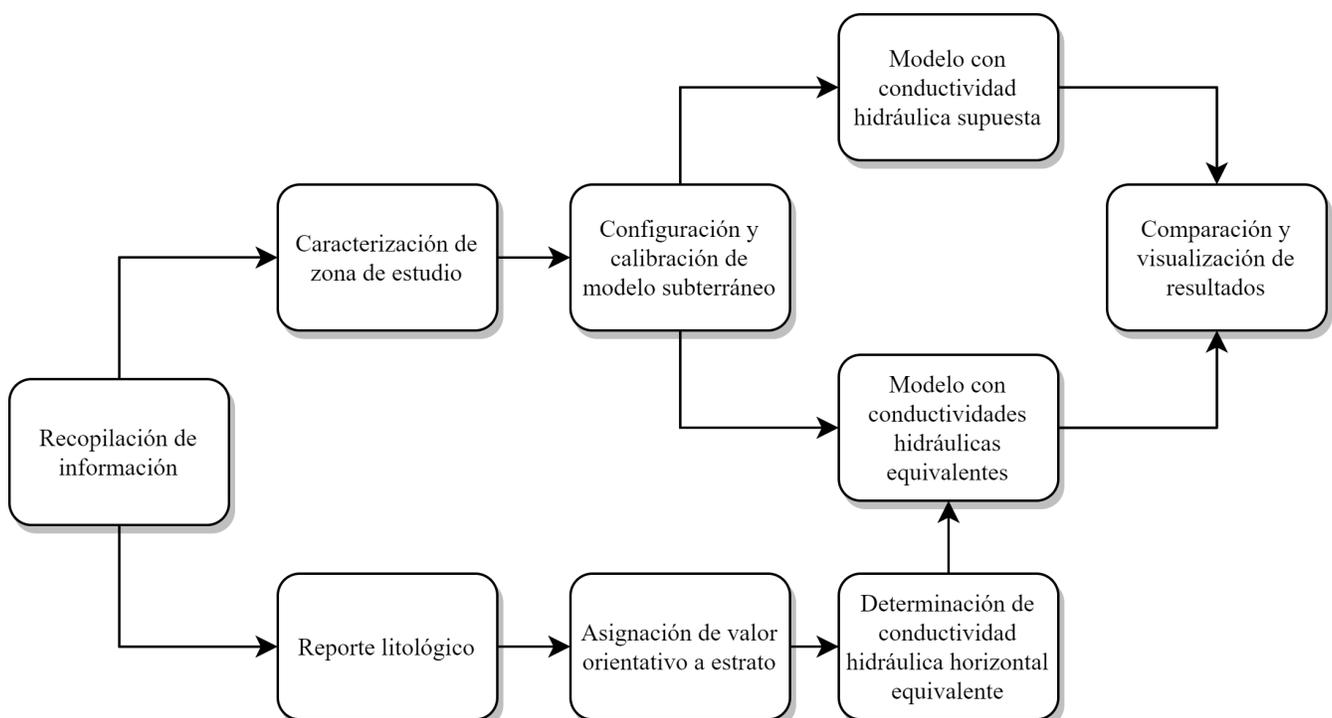
- La elevación del terreno natural (**Figura 3b**), obtenida del procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la región (INEGI, 2013).

- El rendimiento específico, distribuido en dos zonas (**Figura 3c**). Se basó en el valor oficial propuesto por la CONAGUA (2020) (0.16), y se utilizó como parámetro de calibración.
- El coeficiente de almacenamiento, repartido en tres zonas (**Figura 3d**). Al igual que el rendimiento específico, se consideraron como parámetros de calibración del modelo.
- El nivel piezométrico inicial, considerando los del año 1985 (datos sin publicar de la CONAGUA).

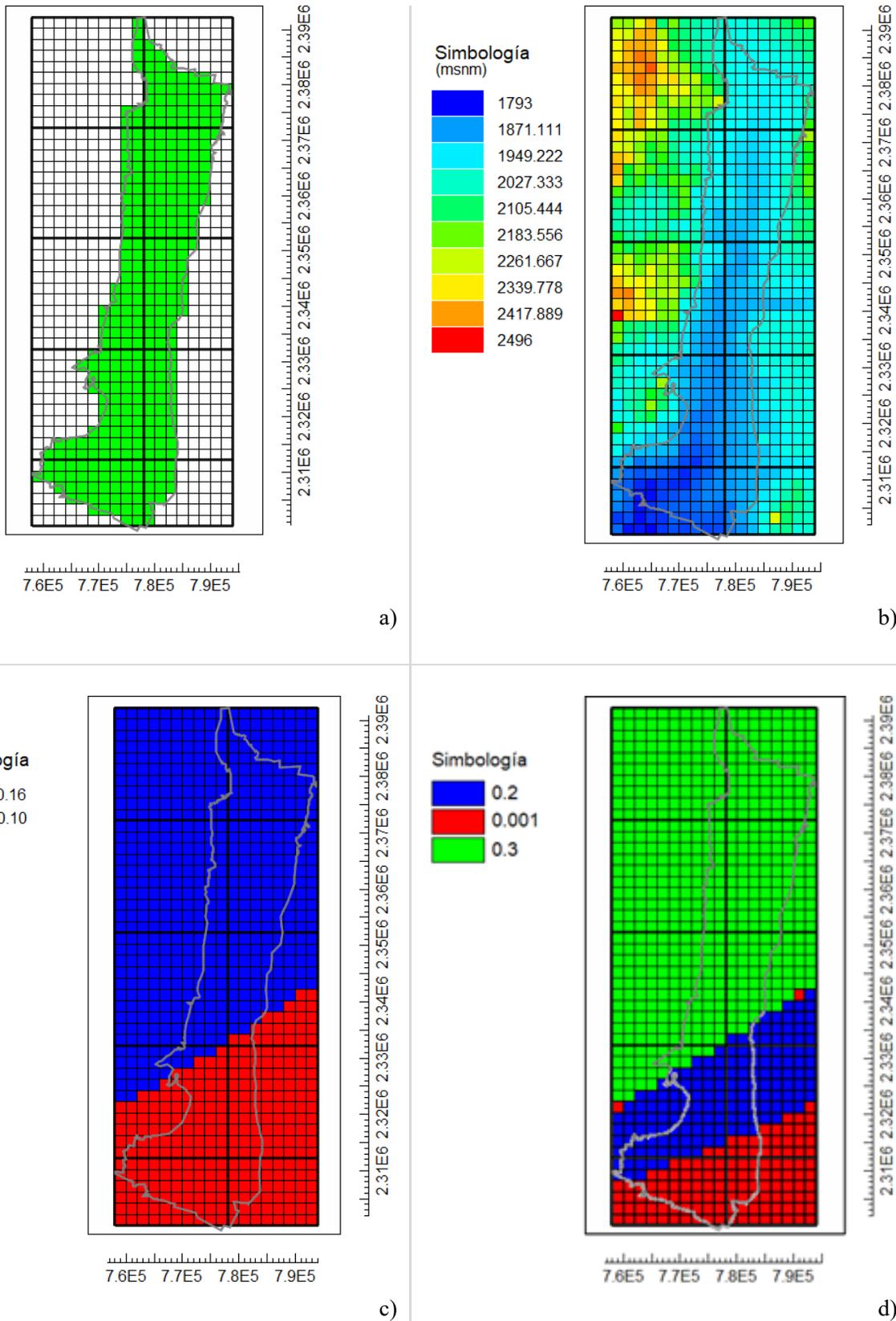
El modelo también requiere de datos de entrada que representen los flujos naturales y/o antropogénicas del agua subterránea, como son la recarga proveniente de precipitación (recarga vertical), flujos horizontales subterráneos, y extracción de pozos. En el modelo se consideró un cambio anual en las recargas verticales (**Figura 4a**), obtenidas de las infiltraciones del modelo de precipitación-escurrimiento HBV (Hydrologiska Bryans Vattenbalsavdelning; Bergström, 1976) a escala mensual realizada para la zona, y en la extracción de pozos (**Figura 4b**), manteniendo un flujo horizontal subterráneo constante (**Figura 4c**).

El balance de entradas y salidas de agua subterránea al acuífero, en términos generales, es de:

- Recarga vertical por precipitación: en prome-



**Figura 2.** Metodología general del trabajo.



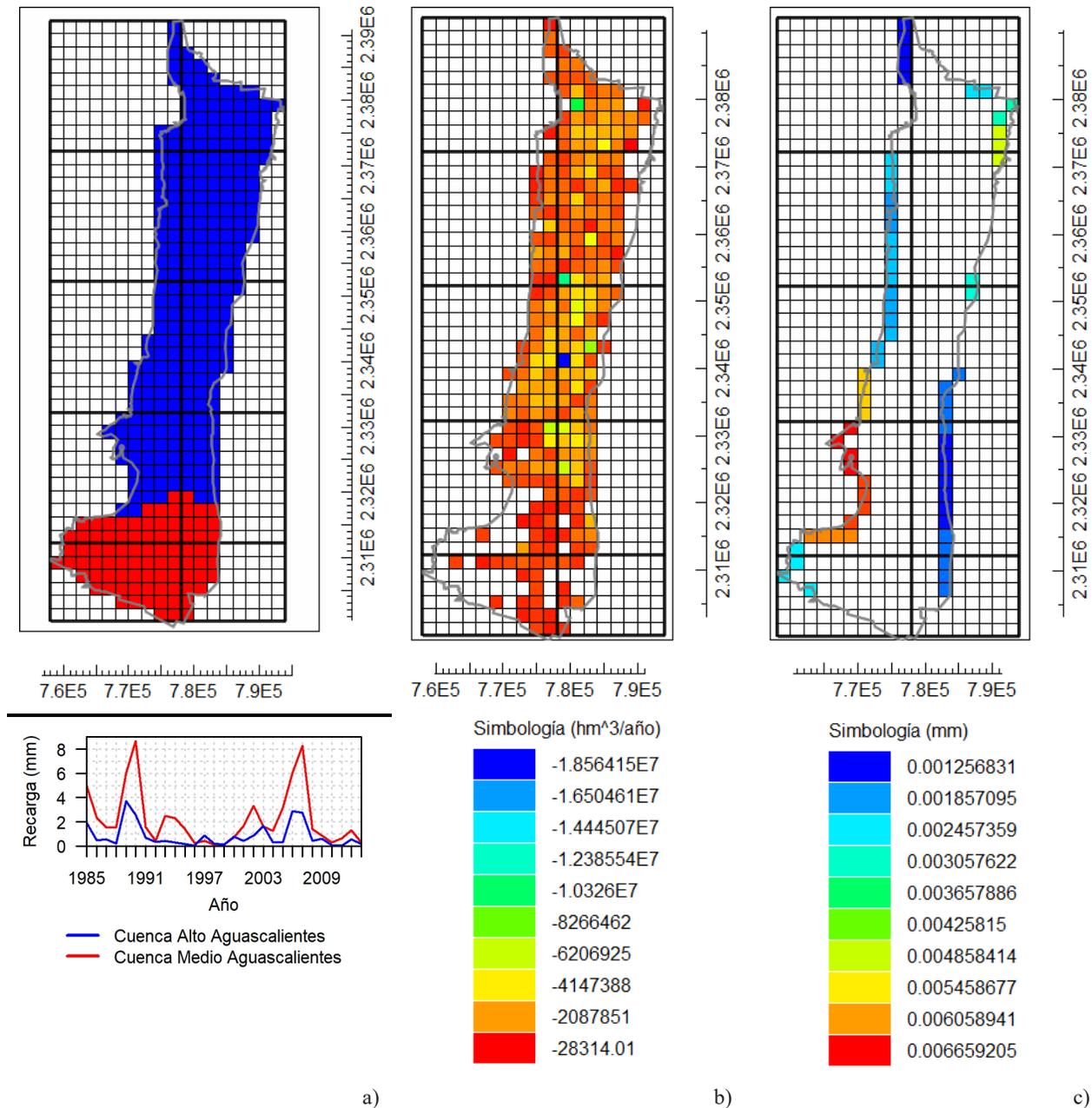
**Figura 3.** Configuración del modelo en MODFLOW y asignación de parámetros (calibrados), donde a) celdas activas del modelo; b) elevación natural del terreno; c) el rendimiento específico; y d) el coeficiente de almacenamiento. Fuente(s): Modificado de INEGI (2013) y CONAGUA (2020). Visualización gráfica en ModelMuse.

dio,  $0.85 \pm 0.98$  mm/año ( $2.36 \pm 2.73$  hm<sup>3</sup>/año) en la zona norte y  $2.25 \pm 2.35$  mm/año ( $1.80 \pm 1.88$  hm<sup>3</sup>/año) en la zona sur.

- Extracción de pozos: 427 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2021)
- Recarga por flujo horizontal: 83.10 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2020)

### Determinación de conductividades hidráulicas horizontales equivalentes

Se basó en un reporte litológico (datos sin publicar) proporcionado por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. En él, se especifica el número de pozo, la latitud y la longitud a las que se ubica, y la elevación del brocal de este. Contiene la descripción litológica de todos los estratos que conforman la zona en donde se encuentra el pozo, indicando el



**Figura 4.** Datos de flujos de entrada y salida del modelo. a) Distribución de la recarga vertical. b) Extracciones de pozos para el año 2014. c) Distribución de la recarga por flujo subterráneo horizontal. Fuente(s): Modificado de CONAGUA (2020, 2021). Visualización gráfica en ModelMuse.

espesor de cada estrato y la profundidad a la que se encuentra. La ubicación de los pozos de muestreo contenidas en el reporte se muestra en la **Figura 1**.

A cada estrato se le asignó un valor con base en los valores orientativos de conductividades hidráulicas para diferentes medios porosos propuestos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2002).

Al considerar el acuífero como una sola capa homogénea, fue necesario encontrar una conductividad hidráulica equivalente, la cual es un valor global asignada al conjunto de capas para considerarlas como una unidad (Sánchez San Román, 2022). Para determinar la conductividad hidráulica equivalente horizontal, se supone que el flujo es paralelo a las capas, y se calcula con la ecuación (1).

$$K_{eq} = \frac{\sum K_i \cdot b_i}{B} \tag{1}$$

donde:

$K_i$  = conductividad hidráulica de cada una de las capas

$b_i$  = espesor de cada una de las capas

$B$  = espesor total, suma de todos los espesores

Aplicando la ecuación (1) a cada pozo de muestreo litológico, se obtuvo un único valor de conductividad hidráulica horizontal equivalente; a partir de estos datos, se realizó una interpolación mediante Kriging para obtener una distribución espacial de las conductividades hidráulicas.

### Calibración del modelo subterráneo

El modelo se inicializó y se calibró utilizando los valores de conductividad hidráulica equivalentes calculados. Se asignaron celdas “calibradoras” (**Figura 1**), eligiéndolas con base a su cercanía a una determinada sección de corte, y donde se ubicaban los pozos de observación con más datos de niveles piezométricos. En estas celdas, se compararon los niveles simulados por MODFLOW contra los observados, y se fueron ajustando los parámetros de coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico hasta obtener índices de calidad de ajuste de modelo satisfactorios con base en la **Tabla 1**.

Se calcularon estos índices para cada año, tanto para las series obtenidas en las celdas calibradoras,

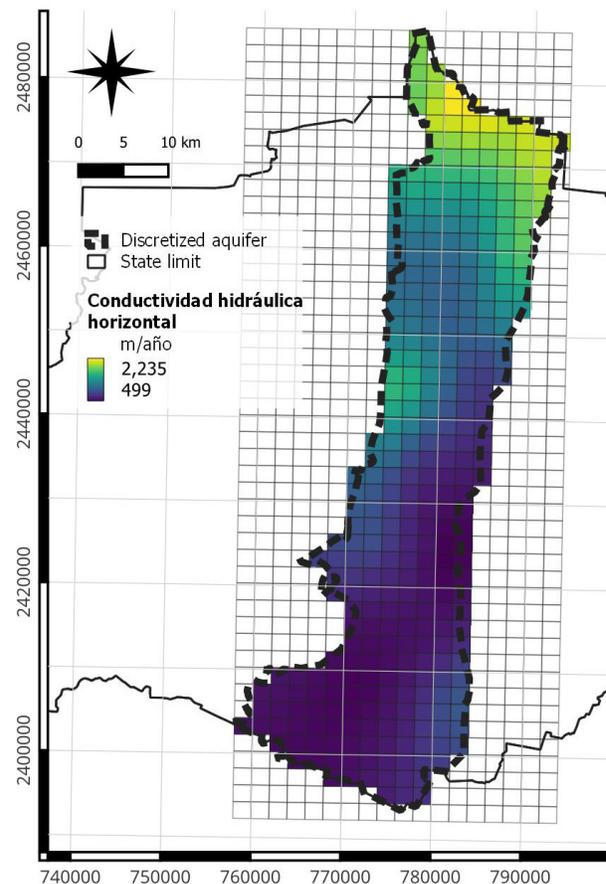
como en las series obtenidas al realizar un corte longitudinal, y se promediaron para obtener valores globales.

Se volvió a simular el modelo calibrado, pero ahora con un valor uniforme de conductividad hidráulica de 730 m/año; valor indicado en el informe de la CONAGUA (2020), y se calcularon los mismos índices y se promediaron para poder comparar estos contra los obtenidos al utilizar las conductividades hidráulicas equivalentes.

## Resultados

La distribución espacial de las conductividades hidráulicas horizontales equivalentes, resultado de aplicar la interpolación Kriging, se muestra en la **Figura 5**.

En la **Tabla 2**, se exponen los valores para los índices de calidad de ajuste promediados, tanto para las celdas calibradoras como para el corte



**Figura 5.** Distribución y valores de conductividades hidráulicas horizontales equivalentes (resolución 2 km x 2 km, coordenadas UTM 13N en m).

**Tabla 1.** Índices de calidad de ajuste utilizados en la calibración del modelo.

Índice	Descripción	Valor buscado	Unidad	Referencia
MAE	<i>Error absoluto medio.</i> Representa la media de errores absolutos entre datos simulados y observados.	0	La misma que la serie evaluada	(Willmott y Matsuura, 2005)
RMSE	<i>Raíz del error medio cuadrado.</i> Similar al MAE, pero al elevar los errores al cuadrado, permite que los errores de mayor magnitud tengan mayor influencia en el total.	0	La misma que la serie evaluada	(Willmott y Matsuura, 2005)
PE	<i>Porcentaje de error.</i> Indica el porcentaje de variabilidad entre la serie simulada y la observada.	0	%	(Moriassi et al., 2015)
NSE	<i>Eficiencia de Nash-Sutcliffe.</i> Compara la magnitud relativa de la varianza residual simulada con la varianza de la serie observada, e indica qué tanto se ajusta la gráfica de datos observados vs simulados a la línea 1:1.	$\geq 0.75$	adim	(Moriassi et al., 2015)
lnNSE	Equivalente a la NSE, normaliza los datos con ln, permitiendo que los valores bajos tengan mayor impacto en el total.	$\geq 0.75$	adim	(Moriassi et al., 2015)
R	<i>Correlación de Pearson.</i> Muestra la similitud que se tiene entre la serie simulada y la observada.	$\geq 0.90$	adim	(Moriassi et al., 2015)
Simetría	Permite evaluar el comportamiento de la serie simulada con respecto a la serie observada.	$\geq 0.75$	adim	(Moriassi et al., 2015)

longitudinal A-A'. Este corte se señala en la **Figura 6**, donde también se observa el comportamiento de los niveles piezométricos observados y simulados para el año 2007. El corte se demuestra en la **Figura 7**.

En la **Figura 8**, se puede observar el ajuste a la línea 1:1 que se presenta al graficar los datos observados contra los simulados para diferentes años en las celdas calibradoras al modelar utilizando conductividades hidráulicas equivalentes y utilizando una supuesta.

## Discusión

Se observa que simular el acuífero usando conductividades hidráulicas equivalentes mejora la distri-

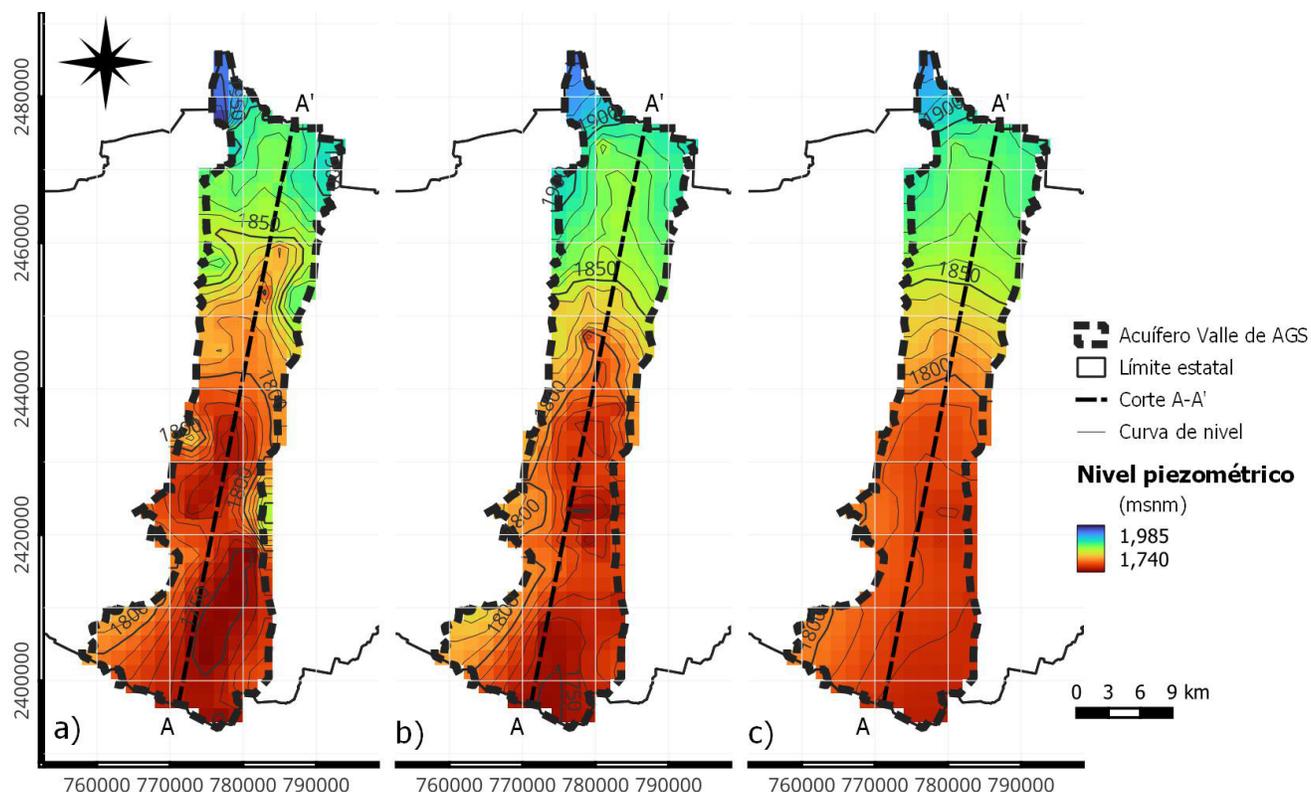
bución de los niveles piezométricos (**Figura 6b**), permitiendo que éstos se comporten de manera similar a lo medido (**Figura 6a**); en cambio, utilizar conductividades hidráulicas supuestas, aun siendo de fuentes fidedignas, resulta en una peor distribución de los niveles (**Figura 6c**) con respecto a los medidos.

Esto se aprecia en el corte de la **Figura 7**; los niveles piezométricos simulados con conductividades equivalentes se ajustan de mejor manera al nivel observado, ya que el nivel simulado con conductividades supuestas sobreestima los valores bajos.

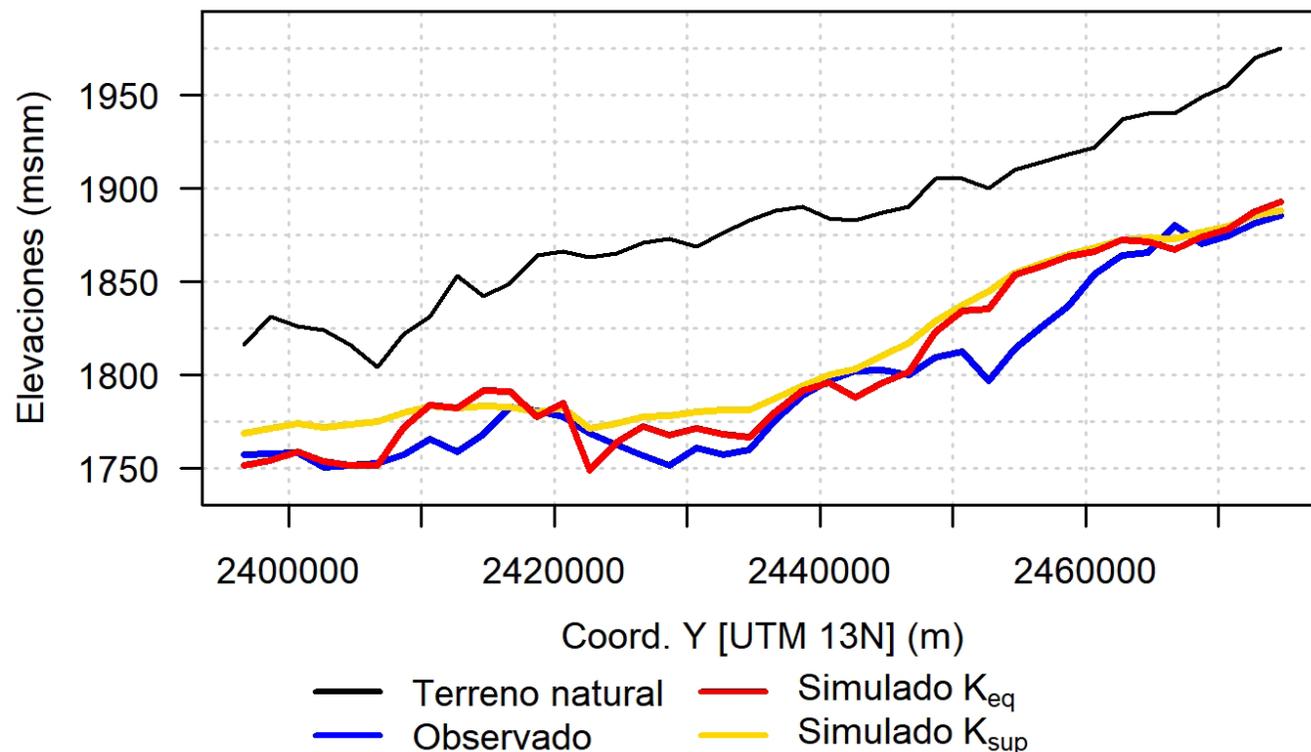
Observando los valores de los índices de calidad de ajuste, las dos propuestas de modelo cumplen con los valores esperados, y se pueden denominar modelos "muy buenos". Sin embargo, se aprecia que, al simular con conductividades

**Tabla 2.** Índices de calidad de ajuste para los modelos.

		MAE (m)	RMSE (m)	PE (%)	NSE (adim)	lnNSE (adim)	R (adim)	Simetría (adim)
$K_{eq}$	Corte A-A'	9.515 ± 9.968	18.530 ± 3.102	0.677 ± 0.280	0.828 ± 0.060	0.827 ± 0.062	0.959 ± 0.034	0.960 ± 0.015
	Celdas	7.485 ± 6.133	20.548 ± 4.344	0.478 ± 0.204	0.872 ± 0.047	0.873 ± 0.046	0.948 ± 0.026	0.966 ± 0.014
$K_{sup}$	Corte A-A'	15.585 ± 8.776	21.049 ± 3.804	0.863 ± 0.486	0.783 ± 0.069	0.781 ± 0.070	0.962 ± 0.028	0.946 ± 0.016
	Celdas	9.721 ± 6.032	21.678 ± 4.710	0.547 ± 0.309	0.862 ± 0.046	0.861 ± 0.045	0.947 ± 0.020	0.961 ± 0.015



**Figura 6.** Niveles piezométricos para el año 2007 (resolución 2 km 2 km, coordenadas UTM 13N en m). a) Niveles medidos (observados). B) Niveles simulados con conductividades hidráulicas equivalentes. C) Niveles simulados con conductividades hidráulicas supuestas. Fuente(s): Elaboración propia a partir de datos de la CONAGUA (datos sin publicar) y el modelo en MODFLOW realizado.



**Figura 7.** Sección longitudinal del acuífero y los niveles piezométricos correspondientes (corte A-A').

hidráulicas equivalentes, se logran mejores valores en los índices, comparando un porcentaje de error en las celdas calibradoras de 0.478% utilizando conductividades equivalentes contra 0.547% utilizando conductividades supuestas (una mejora de 0.069%) y un porcentaje de error en la sección de corte de 0.677% utilizando conductividades equivalentes contra 0.863% utilizando conductividades supuestas (una mejora de 0.186%). Además, al tomar en cuenta la distribución espacial de los niveles, se puede decir que su rendimiento global es mejor que al simular con conductividades supuestas. Se aprecia también, en las gráficas de la **Figura 8**, que el ajuste a la línea 1:1 del modelo obtenido con conductividades hidráulicas equivalentes es ligeramente mejor, aparte de mostrar una menor dispersión en los datos en general.

## Conclusiones

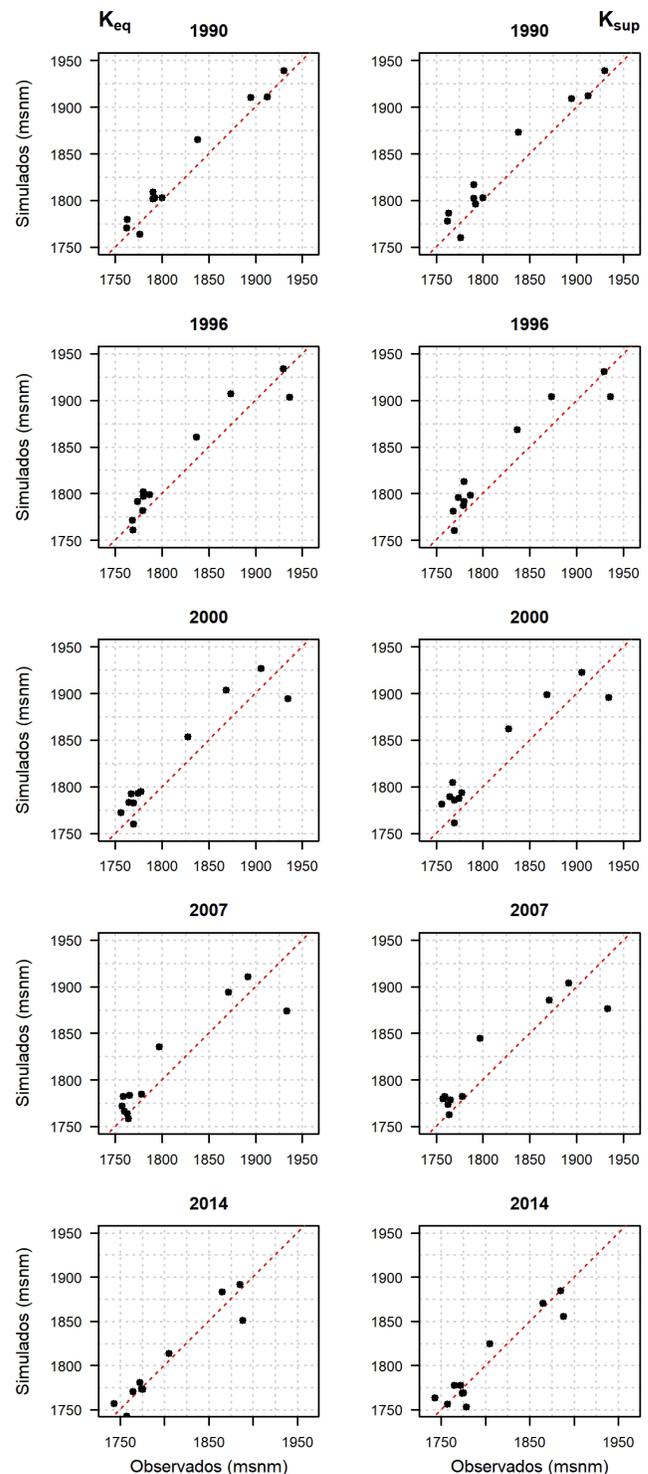
El modelo obtenido utilizando conductividades hidráulicas horizontales equivalentes demostró tener un mejor rendimiento que utilizar conductividades supuestas, aun cuando éstas hayan sido fundamentadas en el informe oficial de la CONAGUA (2020).

Cuando se tenga acceso a datos que describan la litología de la zona de estudio, es recomendable utilizar valores de conductividades hidráulicas horizontales que correspondan a la composición litológica, ya que permite obtener un mejor ajuste del modelo. Sin embargo, también se puede obtener un buen modelo utilizando valores supuestos, en el caso de no contar con este tipo de información, pero se deberán tener consideraciones extras al momento de calibrar (e.g., zonificar el parámetro de conductividad hidráulica) y requerirá de mayor tiempo de calibración.

Invertir trabajo previo en determinar parámetros, tales como la conductividad hidráulica, influye de manera positiva en los valores simulados de un modelo subterráneo, siempre y cuando se tiene la información con la cual trabajar. Esto resulta en un modelo más robusto y fidedigno, e implica menos incertidumbre en su procesamiento posterior.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de



**Figura 8.** Ajuste entre niveles observados y niveles simulados con conductividades equivalentes ( $K_{eq}$ ) y conductividades supuestas ( $K_{sup}$ ).

Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero otorgado al primer autor del presente trabajo. Además, a la CONAGUA, a la Comisión Ciudadana de Agua Potable y

Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes (CCAPAMA) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) por la información que permitió el desarrollo de la investigación; a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y su programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por las facilidades para realizar el trabajo; y a la Maestría en Ingeniería en Recursos Hídricos de la UMSNH y a su Congreso por la oportunidad de divulgar los resultados obtenidos.

## Referencias

- Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. *Norrköping, Sweden*.
- Comisión Nacional del Agua (2020). “Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero del Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes”, [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/Aguascalientes/DR\\_0101.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/Aguascalientes/DR_0101.pdf), [consultado el 20 de octubre 2021].
- Comisión Nacional del Agua (2021). “Registro Público de Derechos de Agua (REDPA)”, <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usos-Agua&ver=mapa&o=1&n=nacional>. [consultado el 25 de julio 2023].
- Ehtiat M, Jamshid Mousavi S, Srinivasan R (2018). Groundwater Modeling Under Variable Operating Conditions Using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a Catchment Scale Approach to Water Resources Management. *Water Resources Management* 32(5): 1631-1649. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1895-z>
- Guerrero Martínez L (2016). *Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación* [Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/669>
- Guerrero Martínez L (2020). Comportamiento hidrodinámico de acuífero del Valle de Aguascalientes y su relación con las discontinuidades superficiales: Ph.D. thesis, *Universidad Autónoma de Aguascalientes*.
- Harbaugh AW (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (Vol. 6). *US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA*.
- Hernández-Marín M, Guerrero-Martínez L, Zermeño-Villalobos A, Rodríguez-González L, Burbey TJ, Pacheco-Martínez J, Martínez-Martínez SI, González-Cervantes N (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal* 26(8): 2811-2826. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). “Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0”, <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Mapa>, [consultado el 25 de julio de 2023].
- INEGI (2021). “Sesión Extraordinaria 2021 Presentación de Resultados Censo de Población y Vivienda 2020”, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>, [consultado el 20 de octubre 2020].
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763–1785. doi: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Pacheco-Martínez J, Hernández-Marín M, Burbey TJ, González-Cervantes N, Ortíz-Lozano JÁ, Zermeño-De-Leon ME, Solís-Pinto A (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology* 164: 172–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Sainz-Santamaria J, Martínez-Cruz AL (2019). How far can investment in efficient irrigation technologies reduce aquifer overdraft? Insights from an expert elicitation in Aguascalientes, Mexico. *Water resources and economics* 25: 42–55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wre.2017.10.003>
- Sánchez San Román FJ (2022). Hidrología Superficial y Subterránea (2a ed.). *Kindle Direct Publishing*. <https://hidrologia.usal.es/Libro.htm>. [consultado el 26 de julio 2023].
- United States Geological Survey (2002). *Basic Ground-Water Hydrology*.
- Willmott CJ, Matsuura K (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research* 30(1): 79-82. doi: <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Winston RB (2022). ModelMuse (5.1.1). *U.S. Geological Survey Software Release*. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.5066/P90QQ94D>