



# Evaluación de los recursos hídricos en el acuífero “Área Metropolitana de Monterrey” en la última década y sus implicaciones en la crisis hídrica de la zona

## Evaluation of water resources in the “Monterrey Metropolitan Area” aquifer in the last decade and its implications in the water crisis in the area

Ulises Absalom Barajas Madrigal, José Jaime Madrigal Barrera\*<sup>ID</sup>, Liliana García Romero, Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

### Historial

Manuscrito recibido: 19 de enero de 2024

Manuscrito aceptado: 21 de junio de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

José Jaime Madrigal Barrera

e-mail: jose.madrigal@umich.mx

ORCID: 0000-0002-3142-8152

### Resumen

Producto de la crisis hídrica vivida en el área Metropolitana de Monterrey durante el año 2022, se realizó una modelación hidrológica superficial y subterránea para analizar los niveles piezométricos del acuífero y establecer las causas probables de la problemática. Se recopiló información climática, hidrométrica, fisiográfica, hidrogeológica y de extracciones. Mediante métodos estadísticos se validaron y completaron los datos climáticos e hidrométricos y se calculó la evapotranspiración potencial. Se montaron y calibraron los modelos superficial y subterráneo, siendo los modelos HBV y MODFLOW, respectivamente, para obtener los niveles piezométricos. Se observó que el acuífero presenta signos de recuperación de alrededor del 2% en sus niveles en años recientes, indicando que la problemática probablemente sea la creciente demanda originada por el aumento poblacional y que no se debe únicamente a factores climáticos.

**Palabras clave:** Monterrey, Acuífero, Modelación hidrológica.

### Introducción

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ha constituido como una de las tres principales urbes de México y un gran motor económico para el país. Se encuentra ubicada en una región semidesértica con poca disponibilidad natural del agua debido a la gran variabilidad existente en las precipitaciones, esto representa un reto constante para la obtención de este recurso vital para una población creciente cuyas demandas de agua cada vez son mayores. Durante el año 2022 el AMM experimentó una de

### Abstract

As a result of the water crisis experienced in the Metropolitan area of Monterrey during 2022, a hydrological modelling was conducted to analyze the aquifer's water tables and establish likely causes of the issue. Climate, hydrometric, physiographic, hydrogeological, and extraction data were collected. Statistical methods were used to validate and complete climate and hydrometric data and calculate potential evapotranspiration. Hydrological models were set up and calibrated to obtain water tables, being the HBV and MODFLOW models, respectively. It was observed that the aquifer has shown signs of recovery of about 2% in recent years, indicating that the problem is likely due to the growing demand caused by population increase.

**Keywords:** Monterrey, Aquifer, Hydrologic modelling.

las mayores sequías de las que se tiene registro, afectando principalmente a la población, quienes experimentaron cortes en el servicio de agua nunca vistos en la zona. Tan sólo unos meses después, al llegar la temporada de lluvias, lo que estaba siendo un evento extremo de escasez, pasó a ser un evento de abundancia, presentándose fuertes lluvias e inundaciones en la metrópoli. Esto levanta interrogantes acerca de si este tipo de eventos de sequía hidrológica son derivados de los cambios recientes en las tendencias climáticas o por el incremento

de la población y sus cambios en los hábitos en el consumo de agua. Actualmente el AMM se abastece principalmente de fuentes de aguas superficiales siendo las presas La Boca, El Cuchillo y Cerro Prieto las que constituyen la infraestructura hidráulica de la metrópoli, representando un 62% del suministro total, siendo el 38% restante de fuentes subterráneas (Aguilar y Ramírez, 2021), por lo cual, el estudio de dichas fuentes resulta de gran interés para el entendimiento de las condiciones en las que se encuentran y evaluar su estado. Se vuelve aún más relevante considerando que exceptuando los informes de disponibilidad por acuíferos que emite la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), no existen estudios específicos que evalúen el estado del acuífero AMM.

A lo largo del tiempo, en el AMM se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con el estudio del agua en la zona. Murillo (1986) evaluó la calidad del agua en el acuífero del AMM, además de determinar la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Se identificaron y analizaron pozos y sus resultados revelaron la presencia de tres tipos de agua predominantes en el acuífero (mixta cálcica, bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica). Se identificaron zonas potencialmente contaminadas en algunos pozos, cerca del 80% de las muestras cumplían con las normas de calidad de agua potable, y se propuso una dirección de flujo hacia el Nornoreste y Noreste del AMM.

Cedillo (2012) evaluó los recursos hídricos en la Zona Metropolitana de Monterrey utilizando un programa de simulación llamado Water Evaluation Planning System (WEAP). Se consideraron fuentes de agua superficiales y subterráneas utilizadas por Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, utilizando datos de varias fuentes. Se simuló el período entre 2005 y 2009, proyectándolo al año 2025, incluyendo escenarios hipotéticos. Los resultados indicaron que, si se mantenían las condiciones actuales de extracción, los recursos hídricos se explotarían en exceso y se podrían agotar acuíferos y generar estrés en las fuentes superficiales. Sin embargo, se encontró que, con una gestión adecuada, como la eficiencia en la distribución y la reutilización de aguas residuales por la industria, se podría satisfacer

la demanda urbana hasta 2025, lo que aliviaría la presión sobre el recurso. En todos los escenarios, los usuarios agrícolas y domésticos podrían experimentar una disminución en la confiabilidad de su suministro debido a la alta demanda urbana. Se concluyó que era necesario seguir trabajando en la gestión integral de los recursos hídricos.

Salinas (2015) encontró que la rápida expansión de los desarrollos humanos en los últimos años a nivel global ha suscitado un interés significativo en diversas áreas de investigación, como el suministro de agua potable, el cambio climático, las energías renovables, la huella hídrica y el desarrollo sostenible. El objetivo de la investigación de Salinas (2015) fue proponer medidas para mitigar el impacto ambiental causado por esta expansión y reducir el deterioro del planeta, planteando métodos para encontrar zonas potenciales para captar agua de lluvia para su aprovechamiento.

Galván (2013) realizó un reconocimiento geológico y prospección geoelectrica detallada, utilizando mediciones de resistividad en el subsuelo. El objetivo era determinar los tipos de materiales presentes, sus espesores, estructuras geológicas y la presencia de zonas con agua subterránea, particularmente canales de grava. Se empleó la técnica de tomografía geoelectrica para identificar áreas adecuadas para la perforación de pozos de extracción de agua. Los resultados de esta prospección condujeron a la ubicación de un sitio para perforar un pozo mediante máquina de percusión, lo cual fue validado por la litología previamente determinada con la tomografía geoelectrica.

En la presente investigación se aborda la problemática relacionada con la gestión de recursos hídricos en el AMM, teniendo en cuenta la variabilidad en las precipitaciones, el rápido crecimiento demográfico, las condiciones climáticas extremas y los desafíos en la disponibilidad de agua en la región, tomando como punto focal la sequía hidrológica suscitada en los últimos años. Se busca comprender el estado actual de las fuentes subterráneas de agua en el AMM y determinar los principales factores que detonaron la crisis hídrica reciente en la región, mediante el uso de los modelos hidrológicos HBV y MODFLOW.

## Materiales y métodos

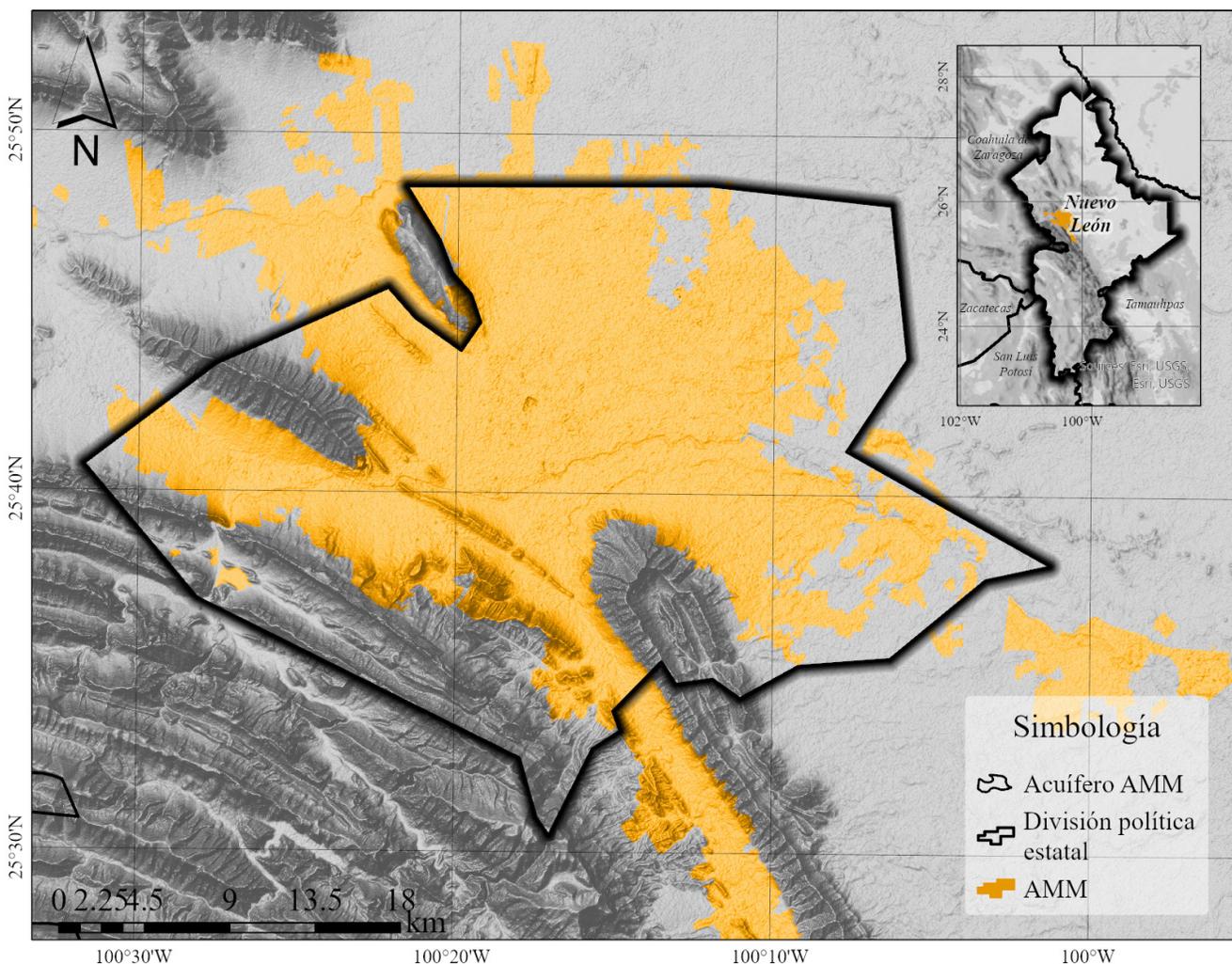
La zona de estudio es el acuífero homologado del Área Metropolitana de Monterrey (**Figura 1**). Este debe su nombre a que se encuentra ubicado justo sobre el AMM, en el estado de Nuevo León.

La metodología seguida en el desarrollo de esta investigación consiste en la recopilación de toda la información requerida, la validación de la información climática e hidrométrica para su adecuada utilización posteriormente en el cálculo de la evapotranspiración potencial y el montaje y calibración de los modelos superficial y subterránea, para finalmente determinar los niveles piezométricos de la zona y hacer su correspondiente análisis. Lo anterior dicho se muestra también en el diagrama de flujo de la **Figura 2**.

## Recopilación de datos

Los datos climáticos se obtuvieron de la base de datos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) administrado por la CONAGUA en donde se consultan los datos de diferentes estaciones climáticas. Se hizo la consideración de que estas deben tener la mayor cobertura posible sobre la zona de estudio, estas estaciones cuentan con información de múltiples variables, siendo de interés para esta metodología datos diarios de precipitación y temperatura media, contando con información en el periodo 1920-2022, y considerando el periodo 1945-2022 para esta investigación

Los datos hidrométricos de escurrimiento provienen de estaciones hidrométricas las cuales se encuentran en la base de datos del Banco Nacional



**Figura 1.** Ubicación del acuífero del AMM.

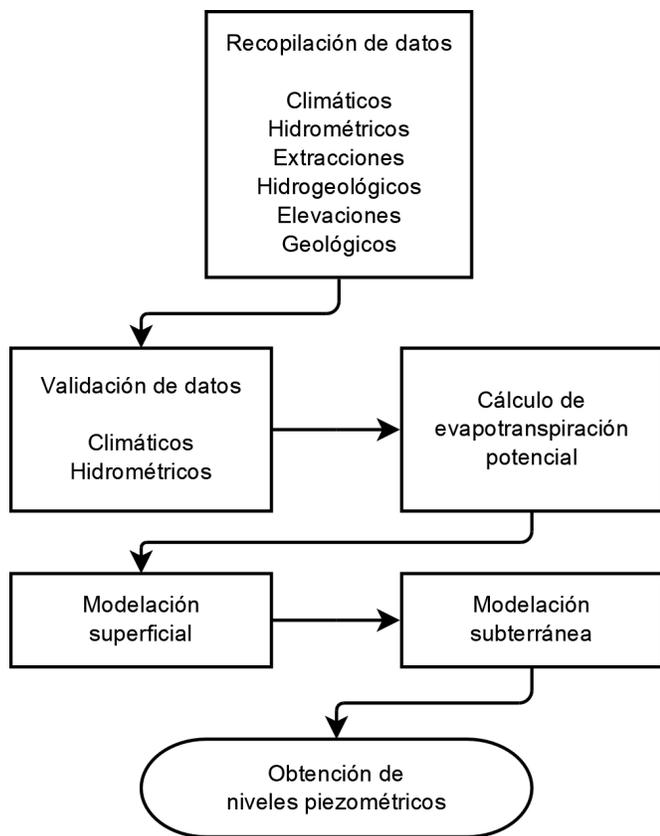


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) operado por la CONAGUA. Estas estaciones registran el nivel y la cantidad de agua que pasa en diferentes escalas temporales, siendo de interés para esta metodología, recopilar los datos diarios de caudal, contando con información en el periodo 1920-2022, y considerando el periodo 1945-2022 para esta investigación.

La selección de las estaciones hidrométricas debe ser más cuidadosa que la de estaciones climáticas, deben tener la mayor cobertura posible de la zona de estudio en función de las cuencas drenadas por dichas estaciones; pero, a su vez, se debe verificar que las estaciones se encuentren ubicadas sobre cauces en su régimen natural y no sobre alguna obra hidráulica, ya que se pretende que los datos obtenidos representen las condiciones naturales de una corriente de agua.

Los datos de extracciones corresponden a las concesiones de aprovechamientos subterráneos y estos se obtuvieron del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) administrado por la CO-

NAGUA. De este portal se han de recopilar, no solo los volúmenes concesionados, sino que también, la localización de estos aprovechamientos y el tipo de uso, contando con información en el periodo 1993-2022, y considerando el periodo 1993-2022 para esta investigación

Los datos hidrogeológicos pueden ser recopilados de estudios o informes realizados en la zona de estudio, una de estas fuentes puede ser los informes de actualización de disponibilidad media anual de aguas subterráneas de los acuíferos administrados por la CONAGUA. Dichos informes se han publicado desde el año 2002 y en ellos se pueden encontrar en algunos casos, rangos de valores para algunos parámetros hidrogeológicos, tales como la transmisividad hidráulica, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, debido a la falta de estudios, se vuelve evidente la carencia de esta información en diversas zonas, por lo que, de no contar con estos datos, se puede consultar bibliografía de valores medios de estos parámetros según la geología de la zona de estudio.

Para obtener datos de elevaciones de terreno, se utilizó información cartográfica proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estos datos de elevaciones se obtienen a partir de modelos digitales de elevación, los cuales permiten representar las variaciones altimétricas del terreno de la zona de estudio. Dichos modelos digitales de elevación son de tipo terreno con una resolución espacial de 15 m.

Los datos geológicos provienen de cartas geológicas ofrecidas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) de las cuales se puede obtener información de litología, formaciones geológicas, entre otros datos de interés. Dichas cartas geológicas han tenido ediciones periódicamente, desde el año 1960 hasta el año 2015, considerándose las del año 2015 para esta investigación.

En el portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) se obtuvieron diversas capas temáticas, siendo de uso y tipo de suelo las que permiten tener una clasificación del suelo, identificando los diferentes tipos de materiales, áreas urbanizadas, agrícolas, fores-

tales, entre otras categorías. Estas capas temáticas se encuentran georreferenciadas y en formato shapefile.

### Validación de datos

Para la validación de datos climáticos de precipitación se utilizaron pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia que permiten dividir un conjunto de datos y determinar si tienen la misma distribución y si dos variables tienen relación alguna o si son completamente independientes. Las pruebas por realizar son: Secuencias (Mather, 1975), Helmert (Doorembos, 1976), Curva Masa Doble (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006), t de Student (Kishore *et al.*, 2016), Cramer (Deka *et al.*, 2016), Wald-Wolfowitz (Siegel y Castellan, 1988) y Límites de Anderson (Anderson, 1942). Se toma como criterio de aceptación aquellas estaciones que cumplan con al menos cuatro de seis pruebas de homogeneidad y que sean independientes.

La validación de datos hidrométricos se realizó mediante la determinación y análisis del coeficiente de escurrimiento (Chow *et al.*, 1988) y el Módulo Relativo (Sánchez 2017). El coeficiente de escurrimiento es la relación entre el volumen escurrido y el volumen precipitado, por lo que este valor debe estar comprendido entre 0 y 1. El Módulo Relativo es la relación entre el caudal y la superficie de la cuenca, de acuerdo con Sánchez (2017) los módulos relativos han de estar comprendidos entre 5 y 15 (l/s)/km<sup>2</sup>.

Dichos indicadores son orientativos, dada la compleja naturaleza de este tipo de datos, los resultados de coeficiente de escurrimiento y módulo relativos no forman parte de un criterio de aceptación o descarte. Queda a criterio del modelador en función de la consideración de las condiciones particulares de la zona de estudio. Para la metodología utilizada se considera la utilización de información hidrométrica que cumpla con los límites establecidos por los indicadores previamente descritos.

### Cálculo de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se calculó por medio del método de Thornthwaite (Wilm *et al.*, 1944), el cual calcula la evapotranspiración

potencial mensual en función de las temperaturas medias mensuales y un índice de calor anual, de esta manera se obtienen las evapotranspiraciones a escala mensual.

### Estimación de datos faltantes

El llenado de datos faltantes de precipitación se realizó por medio del método *Inverse Distance Weighting* (IDW), el cual calcula valores desconocidos con un promedio ponderado de los valores disponibles en puntos conocidos, asignando pesos a cada punto conocido en función de la distancia entre estaciones. Este método es ampliamente utilizado en el contexto de la climatología (Barrios *et al.*, 2018).

La variabilidad temporal de la temperatura no es significativa por lo que el llenado de datos faltantes de temperatura se realiza mediante medias mensuales de cada estación.

### Modelación superficial

La modelación hidrológica superficial es un proceso mediante el cual se simula el comportamiento del ciclo hidrológico en la superficie terrestre. Esta técnica se utiliza para estimar la distribución, el flujo y la cantidad de agua que se mueve a través de una cuenca hidrográfica o una región específica en respuesta a las condiciones climáticas y geográficas.

Para llevar a cabo la modelación hidrológica, se utilizaron modelos matemáticos y computacionales que se basan en principios físicos y empíricos. Estos modelos toman en cuenta datos climáticos históricos, características del suelo, topografía, vegetación y otros factores relevantes para simular cómo se comportará el flujo de agua en una cuenca o región específica. Estos modelos son conocidos como Modelos Precipitación-Escurrecimiento (MPE), de los cuales existen una amplia gama de modelos con diferente conceptualización teórica y número de parámetros: en la presente metodología se plantea utilizar el modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalsavdelning (HBV).

El modelo HBV (Bergström, 1976) es un modelo conceptual con rutinas que considera la humedad del suelo, humedad en la celda subsuperficial y la humedad en la celda subterránea a partir de datos de entrada de precipitación y evapotranspiración

potencial ya sea a escala diaria, mensual o anual. La salida del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca y esta se compone de la escorrentía superficial, el interflujo y flujo base.

Una vez creado el modelo hidrológico superficial, este se debe calibrar. La calibración consiste en encontrar la combinación de parámetros cuyos escurrimientos simulados tengan el mayor ajuste posible a los escurrimientos observados. Este ajuste se ve reflejado en los índices de bondad de ajuste resultantes de cada simulación, los cuales son: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), Eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado (ln NSE) (Oudin *et al.*, 2006) y Coeficiente de Correlación lineal de Pearson (r) (Blyth, 1994).

Con el modelo calibrado, se procedió a hacer el traslado de parámetros y de series climáticas de la cuenca de calibración a las subcuencas que conforman la zona de estudio. De esta manera se obtienen escurrimientos simulados para la zona de estudio, pero, además, como parte del modelo HBV, se obtiene la recarga al acuífero.

### Modelación subterránea

MODFLOW (MODular Finite-difference Ground-Water Flow) es un software ampliamente utilizado para la modelación numérica del flujo de agua subterránea. Es desarrollado y mantenido por el *U.S. Geological Survey* (USGS) y es considerado uno de los programas más destacados y utilizados en el campo de la hidrogeología.

MODFLOW se basa en el método de las diferencias finitas, que discretiza el dominio subterráneo en una cuadrícula tridimensional de celdas. Cada celda representa un volumen de roca o sedimento y se utilizan ecuaciones matemáticas para describir cómo fluye el agua a través de estas celdas y cómo se intercambia agua con las celdas vecinas.

Mediante este software, se discretiza la zona de estudio en una matriz de celdas donde se definen las celdas activas e inactivas, a la vez que se ingresan los datos de entrada de entradas (recarga) y salidas (extracciones), la fisiografía y parámetros hidrogeológicos.

Una vez montado el modelo con toda esta información, se procede a calibrar el modelo, donde los parámetros a calibrar será el coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica. De tal manera que los niveles piezométricos simulados tengan el mayor ajuste a los niveles piezométricos observados. Este ajuste se verá reflejado en el índice de bondad de ajuste del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE).

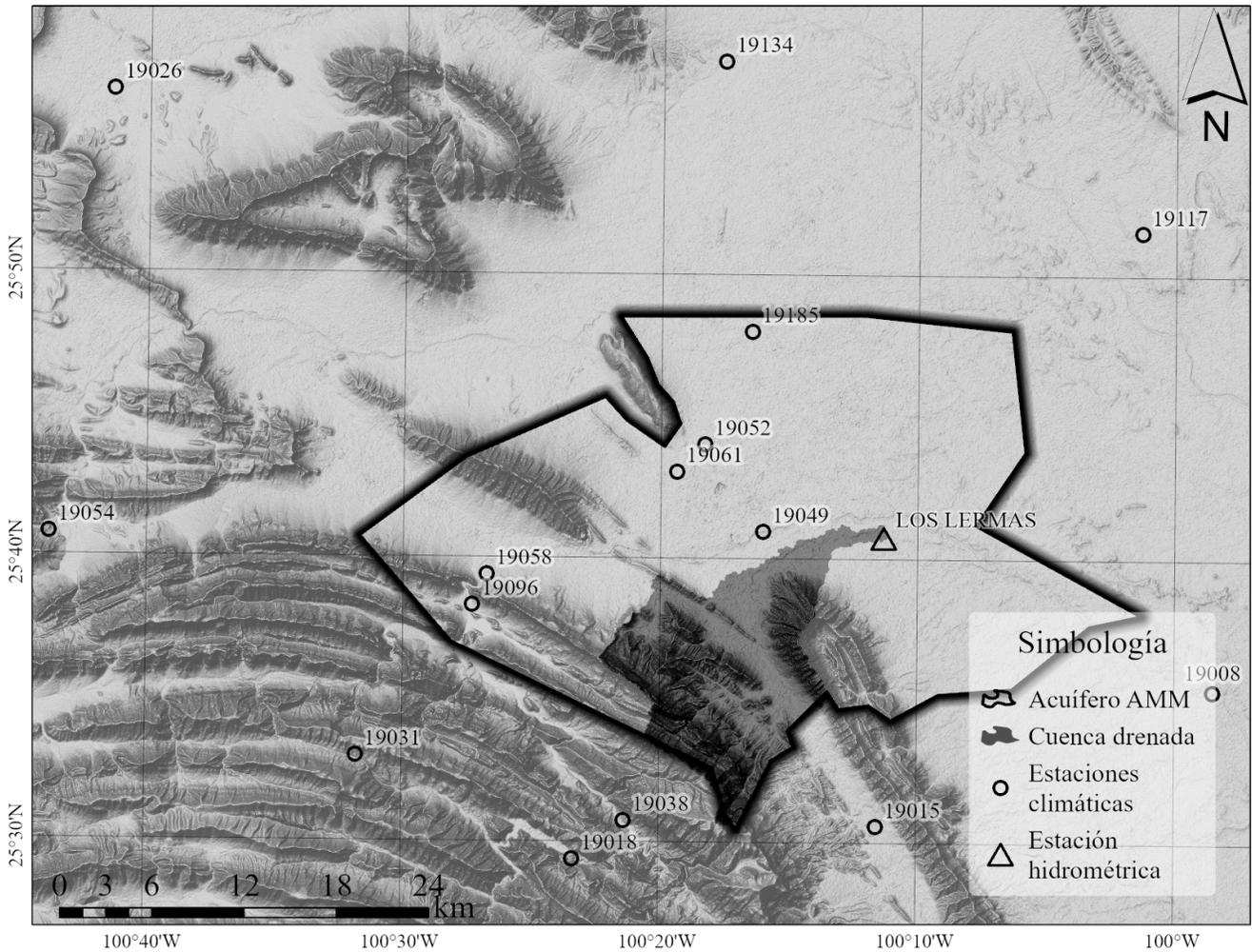
A partir del modelo calibrado se pueden obtener las series temporales y espaciales de los niveles piezométricos de la zona de estudio.

### Resultados

La zona de estudio es el acuífero “Área Metropolitana de Monterrey” ubicado en el estado de Nuevo León. Del SIH se localizaron un total de 18 estaciones climáticas, contando con información constante en el periodo 1945-2022. Estas estaciones se validaron y fueron seleccionadas únicamente 15 estaciones (**Figura 3**). Del BANDAS se localizó una estación hidrométrica cuya cuenca drenada se encuentra dentro de la zona de estudio. Esta estación hidrométrica tiene como nombre *LOS LERMAS* y cuenta con datos en el periodo 1973-1994. El módulo relativo y coeficiente de escurrimiento resultaron de 13.02 (l/s)/km<sup>2</sup> y 0.73, respectivamente.

En el portal del REPDA se encontraron 1312 concesiones de extracciones subterráneas en la zona de estudio para el periodo 1994-2023. El volumen de extracción medio anual es de 141.78 hm<sup>3</sup>. En el informe de “Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Área Metropolitana De Monterrey (1906)” (CONAGUA, 2020), se obtuvieron rangos de valores de transmisividad y conductividad hidráulica. Considerando que en el informe se reporta la existencia de capas de material de aluviones y lutitas, los valores de conductividad hidráulica, según el informe, están comprendidos entre  $1.15 \times 10^{-3}$  a  $1.16 \times 10^{-1}$  y  $1.15 \times 10^{-7}$  a  $9.5 \times 10^{-4}$  m/s, respectivamente, considerando como valores iniciales  $1.2 \times 10^{-2}$  y  $4.8 \times 10^{-4}$  m/s, respectivamente.

De acuerdo con Iglesias (1984), los valores de coeficiente de almacenamiento para aluviones y lutitas están comprendidos entre 0.05-0.15 y 0.0005-0.01, respectivamente. Considerando como



**Figura 3.** Localización de las estaciones climáticas e hidrométricas en relación con la zona de estudio.

valores iniciales 0.02 y 0.01 respectivamente. De las fuentes mencionadas en la metodología para la recolección de información fisiográfica se obtuvieron archivos tipo ráster y vectorial de los conceptos previamente descritos. Los datos faltantes de precipitación y temperatura de las estaciones climáticas se estimaron, completando series de datos en el periodo 1945-2022, llenando un 32% de los vacíos de las series originales (**Figura 4**).

A partir de los datos de temperatura, se calculó la evapotranspiración potencial para el periodo 1945-2022. Se configuró el modelo hidrológico superficial HBV, mismo que fue calibrado para el periodo de 1973-1987 (**Figura 5**).

Los índices de bondad de ajuste resultantes para el modelo calibrado se pueden observar en la **Tabla 1**:

Se delimitaron 8 subcuencas de simulación, las cuales tienen extensión sobre todo el acuífero, por lo que, a partir de los parámetros calibrados del modelo, se hizo un traslado de parámetros y series climáticas a los centroides de las subcuencas. De esta manera se obtuvieron las series de recarga para todo

**Tabla 1.** Valores de los índices de bondad de ajuste del modelo calibrado

Índice	HBV
NSE	0.65
ln NSE	0.57
r	0.82
Promedio	0.68

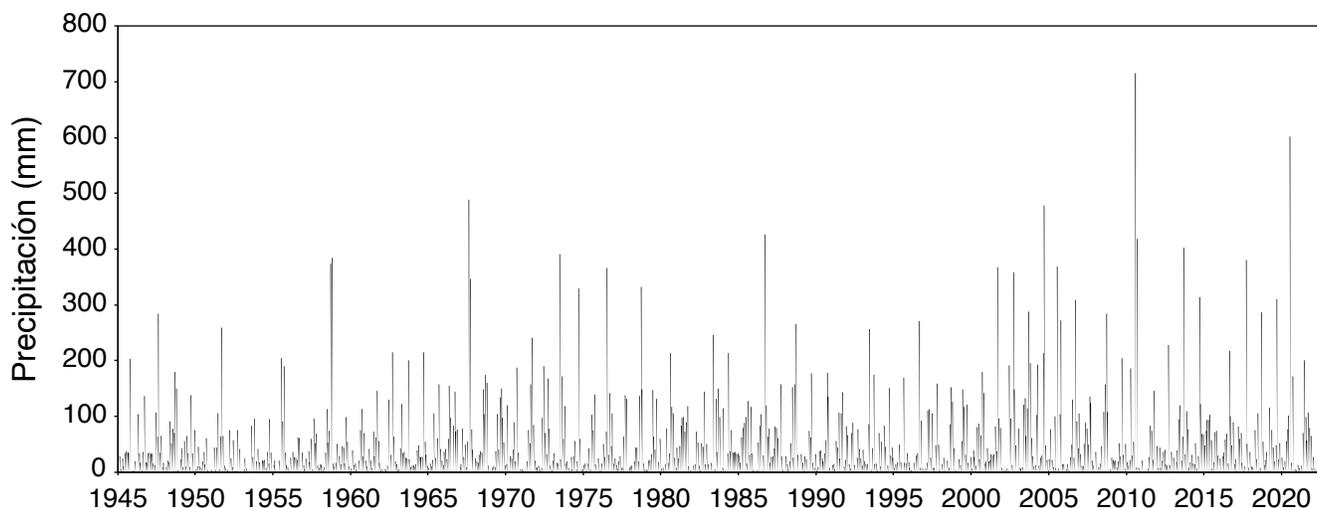


Figura 4. Resultados del llenado de datos faltantes de precipitación en la estación *MONTERREY, NL*.

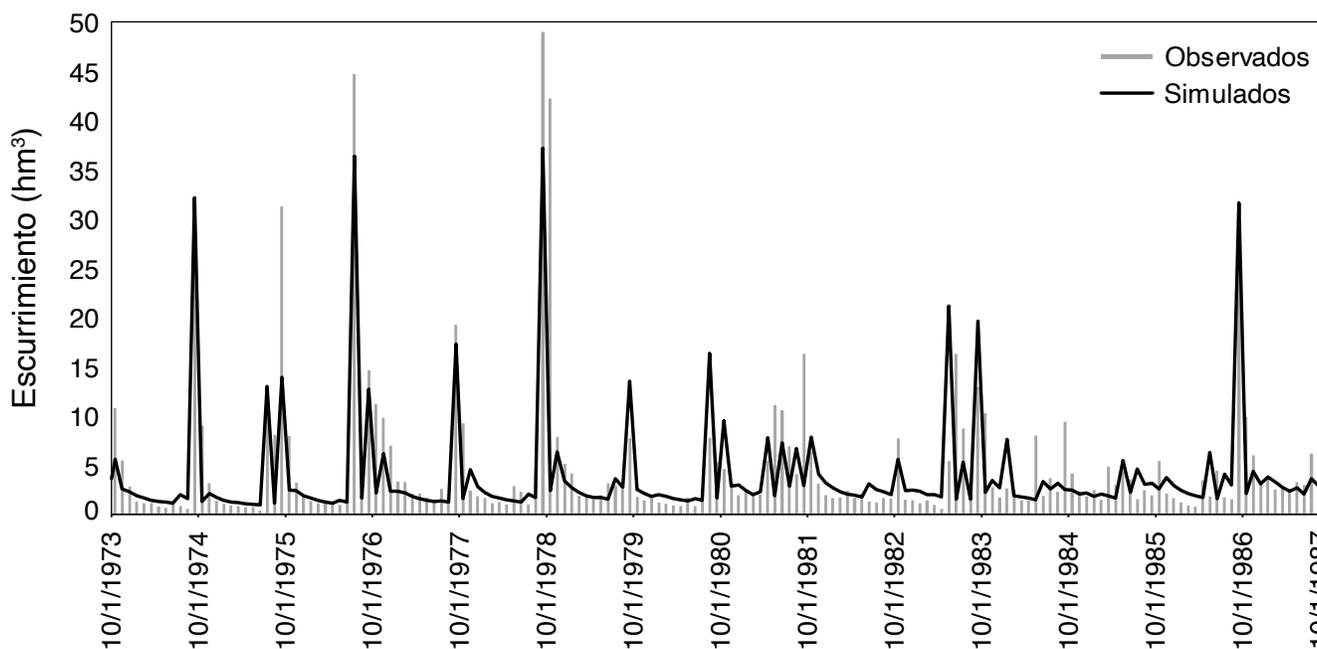


Figura 5. Comparación entre los valores observados y simulados de escurrimiento.

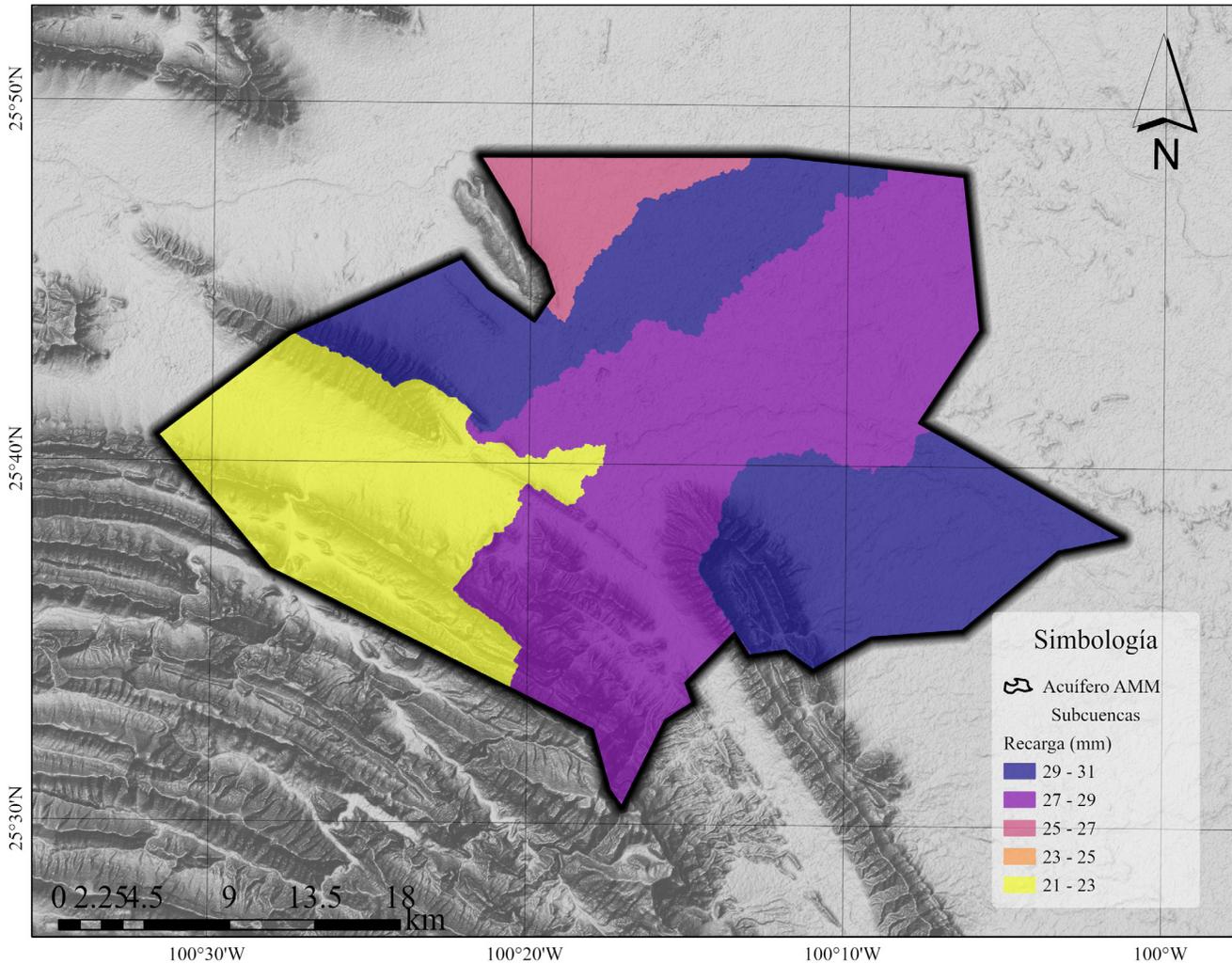
el acuífero para el periodo 1945-2022 (**Figura 6**).

Se montó el modelo hidrológico subterráneo, discretizando la extensión de la zona de estudio en una matriz de 21 columnas y 14 filas, con un tamaño de celda de 2.5 x 2.5 km. Toda la información requerida (celdas activas, recarga, extracciones, fisiografía y parámetros hidrogeológicos) se ingresaron al modelo, logrando así una primera simulación para el periodo 1994-2022.

Se procedió a calibrar el modelo, variando

la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, resultando los valores de  $5.86 \times 10^{-2}$  y  $4.75 \times 10^{-4}$  para aluviones y lutitas, respectivamente, para la conductividad hidráulica, y 0.1 y 0.0052, respectivamente, para el coeficiente de almacenamiento, logrando así los resultados que se observan en la **Figura 7**.

A partir del modelo calibrado se obtuvieron los niveles piezométricos en el acuífero para el periodo 1994-2022. Como ejemplo, en la **Figura 8**



**Figura 6.** Recarga media anual para las subcuencas delimitadas.

se presenta la ubicación de las celdas 115 y 216, en las cuales posteriormente se presentará la evolución del nivel piezométrico **Figura 9**.

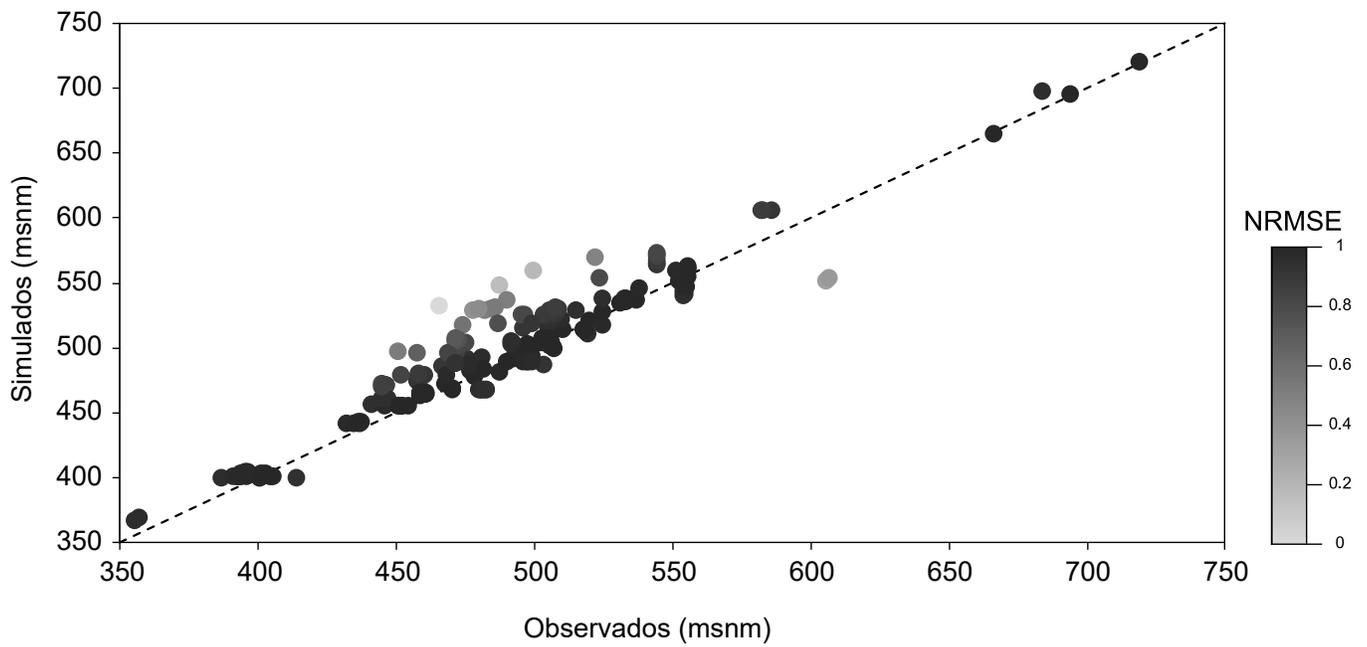
En la **Figura 10** se presenta la distribución espacial de la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero del AMM en el periodo 1994-2022.

### Discusión

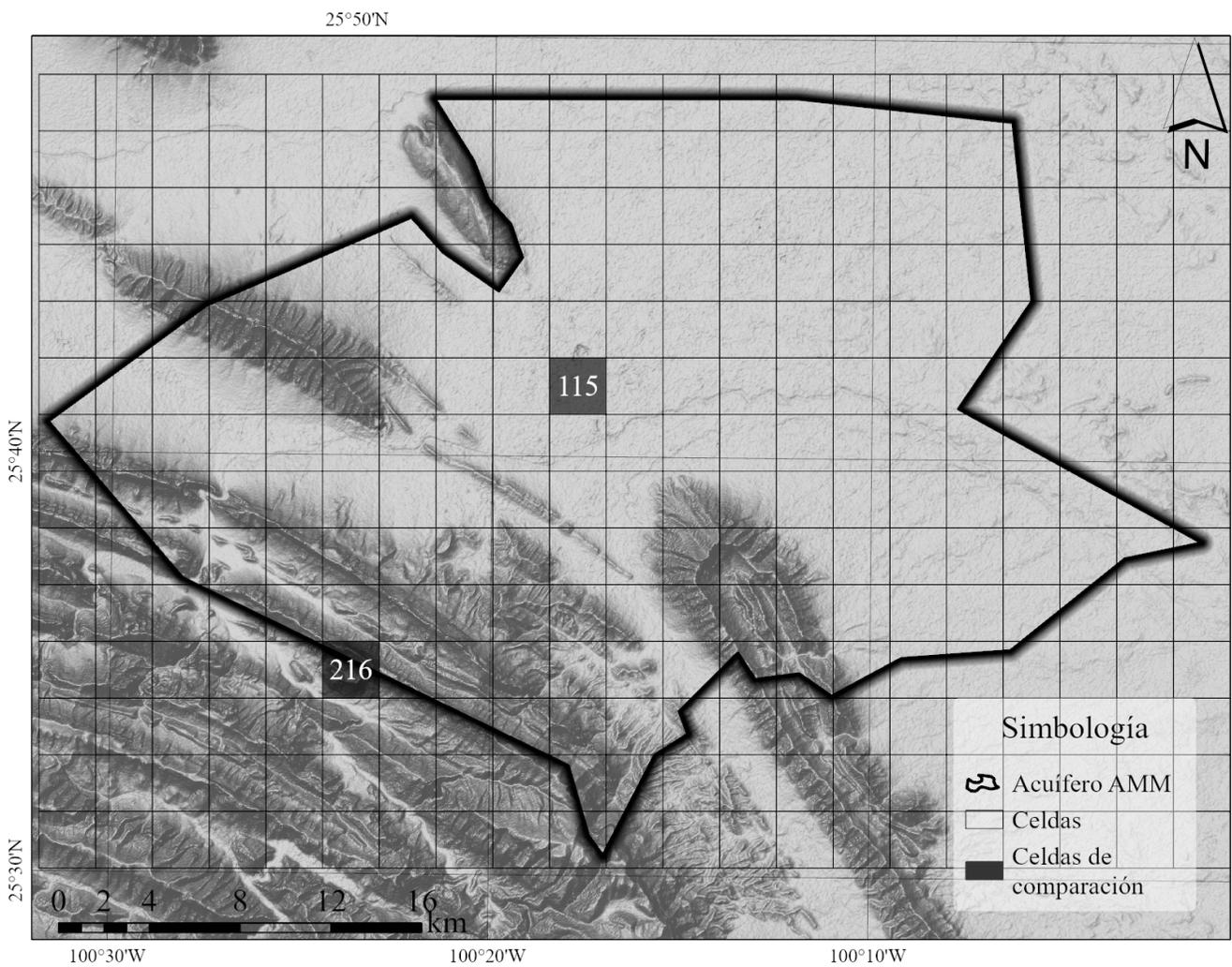
Con base en los resultados obtenidos de los niveles piezométricos simulados del modelo hidrológico subterráneo, se puede establecer que, en las zonas de planicie de la superficie del acuífero, como se observa en la **Figura 9a**, existen signos de recuperación en los niveles piezométricos que se cuantifican de alrededor del 2% en el periodo considerado. Sin embargo, en las zonas montañosas se presentan

abatimientos en los niveles piezométricos tal como se observa en la **Figura 9b**, pudiéndose generalizar lo anterior dicho tal como se presenta en la **Figura 10**.

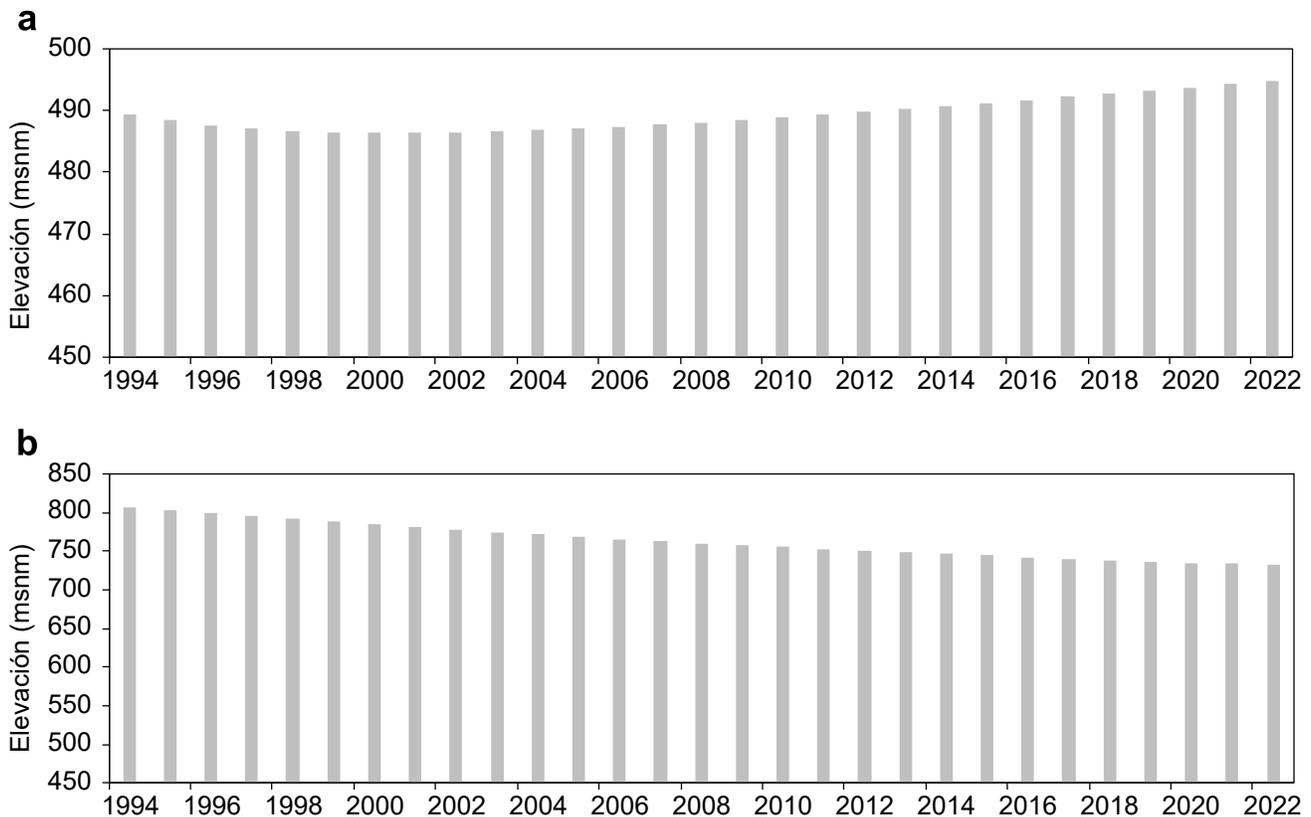
La crisis hídrica que se vivió durante el año 2022 en la zona de estudio tuvo su punto máximo en el mes de junio, caracterizado por sus pocas reservas de agua en las presas y altas temperaturas, siendo la única esperanza para la población y las autoridades que llegase la época de lluvias para mitigar la situación de emergencia. Esto genera incertidumbre sobre si la crisis hídrica fue consecuencia de una disminución de las precipitaciones en la zona o si se debió a otra circunstancia. Para ello, a continuación, se presenta el registro histórico de precipitaciones anuales en la estación climática



**Figura 7.** Comparación entre los valores observados y simulados de niveles piezométricos.



**Figura 8.** Ubicación de las celdas de comparación para la evolución del nivel piezométrico.



**Figura 9.** Evolución del nivel piezométrico en la celda **a)** 115 y **b)** 216.

#### 19049 MONTERREY, NL (Figura 11).

De dicha serie histórica se puede observar que en el periodo 1945-1999 se contabilizaron 18 años húmedos y 32 años secos, representando los años húmedos un 36% en ese intervalo de tiempo, mientras que en el periodo 2000-2022 se contabilizaron 17 años húmedos y 6 años secos, representando los años húmedos un 74%, por lo que se puede decir que la evolución de la precipitación tiene una tendencia al alza en los últimos años.

De acuerdo con Aguilar y Ramírez (2021), en el periodo 1954-2017 la demanda de agua en el AMM ha aumentado en un 1600%, este incremento es proporcional al aumento de la población, tal como se muestra en la **Figura 12** con datos de población del INEGI (2023a) en el AMM.

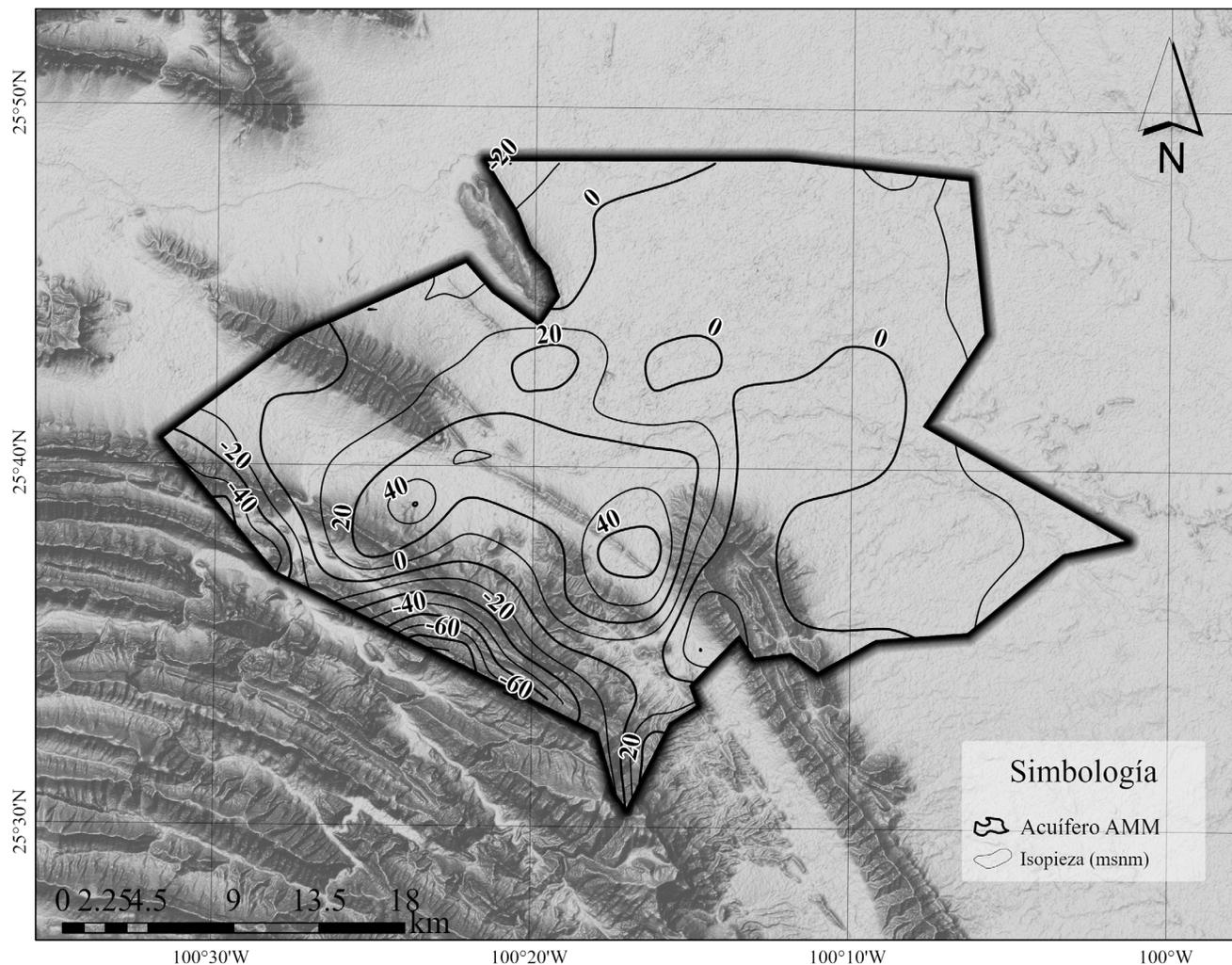
Aguilar y Ramírez (2021) indican que las fuentes superficiales representan el 62% del abastecimiento de agua para el AMM, siendo el 38% proveniente de fuentes subterráneas. Realizando una proyección, se puede estimar que para el año 2040 se esperaría que el AMM tenga una población de cerca de 6 millones

de habitantes (**Figura 13**), correspondiéndole una demanda de 16,000 l/s.

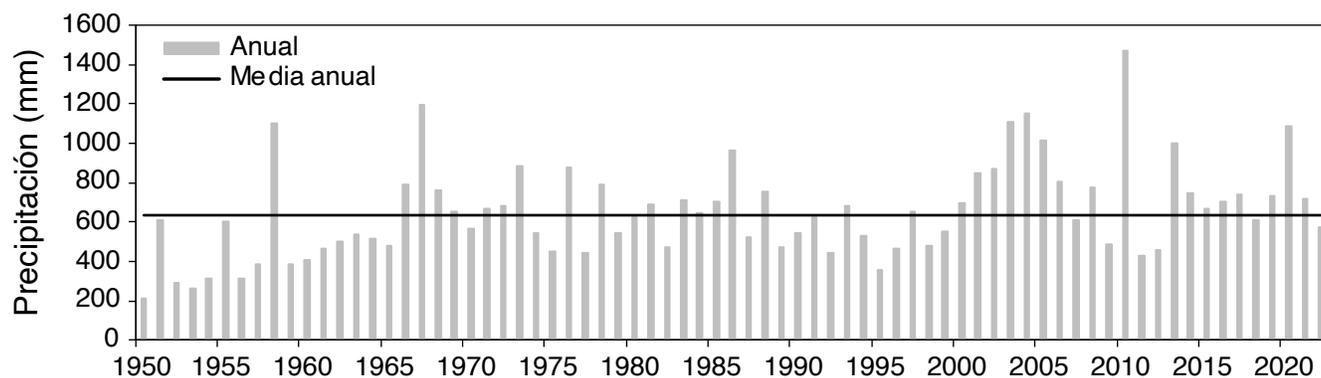
#### Conclusiones

Mediante el modelo superficial se determinaron las series de recarga al acuífero, alimentando el modelo subterráneo y obteniendo los niveles piezométricos en el periodo 1994-2022. Los resultados de los modelos hidrológicos fueron los esperados. Sin embargo, la eficiencia de estos depende principalmente de la disponibilidad de información en cantidad y en calidad, por lo que, es necesario refinar los modelos introduciendo información más detallada de las condiciones de la zona de estudio a fin de lograr simulaciones que representen mejor la realidad.

Basado en los resultados obtenidos, la evidencia indica que el posible causante de la carencia de agua durante el año 2022 en el AMM es la gran demanda de agua, producto del aumento de la población. Desde hace años se observa que el acuífero no tiene la capacidad de suplir la creciente



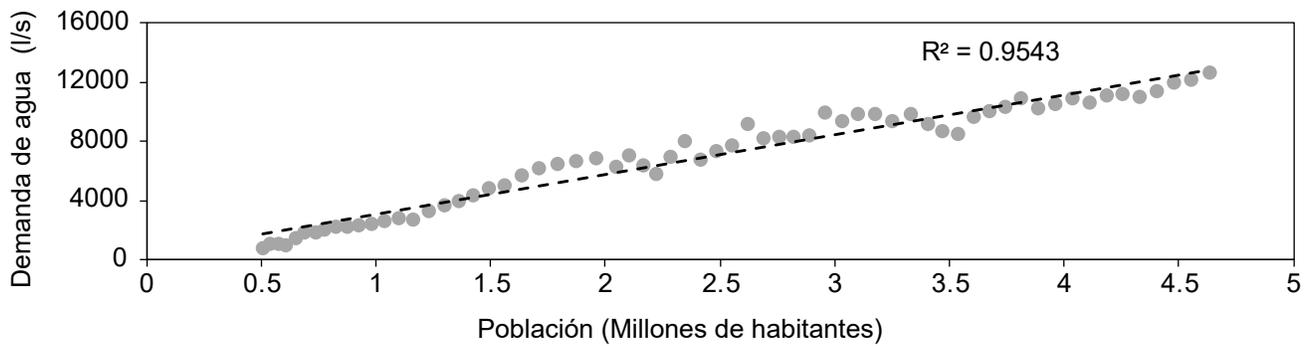
**Figura 10.** Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero del AMM en el periodo 1994-2022.



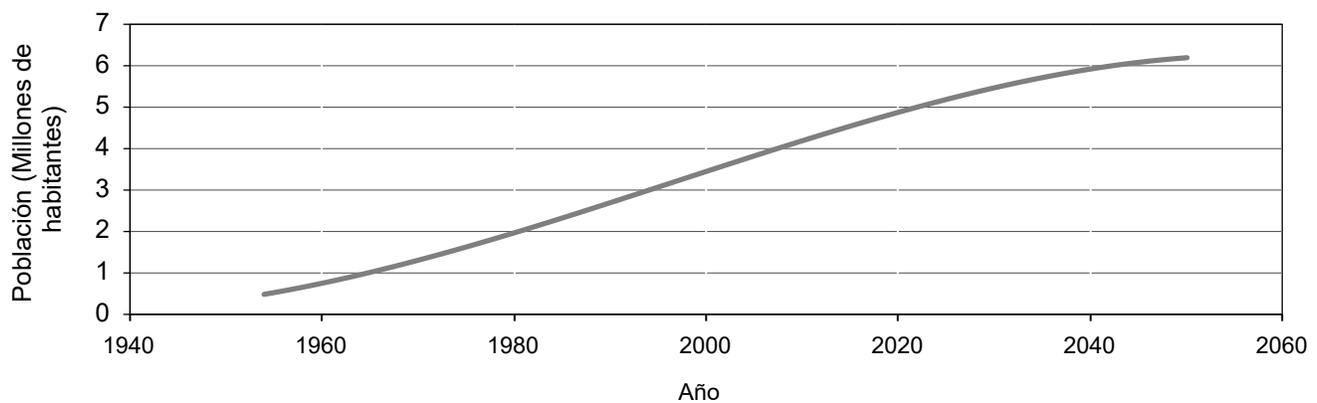
**Figura 11.** Serie histórica de precipitación anual.

demanda, siendo las fuentes superficiales las que están sometidas a un mayor estrés hídrico debido a que el abastecimiento depende en mayor medida de estas. Aunado a las proyecciones de demanda,

el panorama no es muy favorable, a menos que se implementen medidas que ayuden a reducir el consumo de agua y que aumenten la eficiencia de los sistemas de abastecimiento.



**Figura 12.** Correlación de la demanda de agua ante el crecimiento de la población en el AMM



**Figura 13.** Población proyectada en el AMM.

## Referencias

Aguilar Barajas I, Ramírez Orozco AI (2021). Agua para Monterrey: logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México. 2a edn. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León.

Anderson RL (1942). Distribution of the serial correlation coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics* 13(1):1-13. doi:10.1214/aoms/1177731638.

Barrios A, Trincado G, Garreaud R (2018). Alternative approaches for estimating missing climate data: application to monthly precipitation records in South-Central Chile. *Forest Ecosystems* 10:1-10. doi:10.1186/s40663-018-0147-x.

Bergström S (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments (Utveckling och tillämpning av en begreppsmässig avrinningsmodell för Skandinaviska nederbördsområden (swe)). RHO, Hydrologi och Oceanografi.

Blyth S (1994). Karl Pearson and the Correlation Curve. *International Statistical Review* 62(3):393-403. doi:10.2307/1403769.

Cedillo LL (2012). Evaluación de las fuentes abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Monterrey. MSc thesis, *Tecnológico de Monterrey*, p 167.

Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, p 597.

CONAGUA (2020). “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Área Metropolitana de Monterrey (1906), Estado de Nuevo León”, [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/nleon/DR\\_1906.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/nleon/DR_1906.pdf), [consultado el 18 de junio de 2022].

Deka RL, Mahanta C, Nath KK, Dutta MK (2016). Spatio-temporal variability of rainfall regime in the Brahmaputra valley of North East India. *Theoretical and Applied Climatology* 1186:793–806. doi:10.1007/s00704-015-1452-8.

Doorembos J (1976). Agro-meteorological field stations. *Irrigation and Drainage Paper No. 27*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Galván SM (2013). Estudio de prospección geohidrológica mediante métodos geológico-geofísicos para la prospección de agua subterránea en la huerta Santa Catarina, municipio

de Linares, Nuevo León, México. MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p 81. No incluye sección de anexos o material complementario.

Iglesias A (1984). "Hidrogeología" LI González de Vallejo M Ferrer Gijón L Ortuño Abad, and C. Oteo Mazo, *Ingeniería Geológica*, Madrid, Prentice Hall, 2002, p 38.

Kishore P, Jyothi S, Basha G, Rao SVB, Rajeevan M, Velicogna I, Sutterley TC (2016). Precipitation climatology over India: validation with observations and reanalysis datasets and spatial trends. *Climate Dynamics* 46(1):541-556. doi:10.1007/s00382-015-2597-y

Martínez Alfaro PE, Castaño Castaño S, Martínez Santos P (2006). Fundamentos de Hidrogeología. *Mundi-Prensa*, p 270.

Mather JR (1975). Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques. *Publications in climatology* 58:53-54.

Murillo ME (1986). Estudio hidrogeoquímico del área metropolitana de Monterrey, N.L.: MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p. 71. Incluye sección de anexos con seis mapas y tablas complementarias.

Nash JE, Sutcliffe JV (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles.

*Journal of Hydrology* 10(3):282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

Salinas JC (2015). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como recurso alternativo. MSc thesis, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, p. 66. Incluye sección de anexos con ilustraciones y tablas complementarias.

Sánchez FJ (2017). Hidrología Superficial y Subterránea: *Createspace Independent Pub*, p 391.

Siegel S, and Castellan NJ (1988). Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences: *McGraw-Hill*, p 312.

Oudin L, Andréassian V, Mathevet T, Perrin C, Michel C (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resour. Res.* 42(7):W07410. doi:10.1029/2005WR004636.

Wilm HG, Thornthwaite CW, Colman EA, Cummings NW, Croft AR, Gisborne HT, Harding ST, Hendrickson AH, Hoover MD, Houk IE, Kittredge J, Lee CH, Rossby C-G., Saville T, Taylor CA (1944) Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943-44. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25(5):683-693. doi:10.1029/TR025i005p00683