



OBTENCIÓN DE VOLÚMENES DE RECARGA EN ACUÍFEROS MEXICANOS MEDIANTE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA

**Maria Guadalupe Manzo Oseguera¹, Liliana García-Romero², Sonia Tatiana
Sánchez Quispe³, José Guadalupe⁴ García Contreras**

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo
mgmo32498@gmail.com

RESUMEN

En México la sobreexplotación de acuíferos es un problema que ha ido en aumento. Los acuíferos denominados Zamora y Cotija, son dos acuíferos que ocupan una extensión aproximada de 5026 km² en el estado de Michoacán. En la actualidad, son dos de los acuíferos que no han sido declarados sobreexplotados, pero existe una ligera diferencia entre la disponibilidad de agua y la explotación, provocando que en los próximos años sea una zona con escasez de agua. Ambos acuíferos se encuentran en zonas agrícolas con gran importancia dentro del país, definida como la principal zona de exportación de aguacate, y berries. La principal fuente de abastecimiento para el riego son las aguas subterráneas, es por ello la necesidad e importancia de realizar los trabajos de investigación que contribuyan al monitoreo y aprovechamiento de recursos en la zona.

Es importante tener un buen control y una correcta gestión de los recursos hídricos disponibles. El objetivo de esta investigación es evaluar los recursos hídricos y determinar los volúmenes de recarga. Actualmente, no existen investigaciones que permitan conocer la situación actual de los recursos disponibles en la zona. Para ello, se ha desarrollado un modelo precipitación-escorrentía para estimar los volúmenes de recarga, así como la disponibilidad de los recursos hídricos en la zona.

Palabras clave

Témez, Acuíferos, Modelo

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad estamos viviendo una grave problemática por malas gestiones de recurso hídrico, desafortunadamente en nuestra sociedad no existe el conocimiento ni la conciencia sobre las consecuencias de la sobreexplotación, deterioro y desperdicio de los recursos hídricos en el mundo, y más aún en los sistemas subterráneos, es importante estudiarlo y monitorearlo, debido a que el agua es uno de los recursos más importantes ya que es el recurso natural esencial para la vida, es un recurso renovable pero finito, su calidad se ve afectada mayormente por actividades de origen antrópico y si continua el uso desmedido y descuidado

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

del agua, se podrían presentar graves problemas que podrían provocar que este recurso cada vez sea más caro y difícil de conseguir (Cirelli, 2012).

En la actualidad el 47% de la población en México no tienen acceso al agua potable, debido a que no se cuenta con la capacidad suficiente para abastecer el servicio, y se presenta un conocimiento deficiente referente al comportamiento de aguas subterráneas. Adicionalmente se presenta una mala calidad y cantidad de información del recurso superficial, mismo que tiene influencia directa con el agua subterránea. Es necesario conocer cómo se genera y comporta el agua subterránea en los acuíferos ya que es la reserva más importante de agua dulce en el Planeta. Actualmente, debido a las demandas excesivas de la población, estos sistemas de agua subterránea se están sobreexplotando en su totalidad (Gálvez, 2011).

A pesar de que México carece de información necesaria para hacer los estudios hidrológicos superficiales y subterráneos, en nuestro país se sigue realizando los balances hídricos en la mayoría de los acuíferos.

La lluvia como única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrológica es sin duda, uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance. En este aspecto, los países con un régimen de lluvia netamente estacionario o con amplias zonas desérticas, son propensos a presentar largos períodos de escasez o de exceso (Mijares, 2006).

2. METODOLOGÍA

Como parte de la metodología esta la gestión de datos, que es de las partes importantes del estudio, y para tener datos fiables, se requiere realizar pruebas de homogeneidad (como son Secuencias y Helmert), y comprobar su independencia (mediante los límites de Anderson). Para modelar y obtener el volumen de recarga en la zona de estudio, se propone el uso del módulo Témez con un modelo de simulación Precipitación-escorrentía (dentro del software Evalhid), con el cual se calculó la disponibilidad hídrica media anual. El objeto del uso de esta herramienta es lograr calibrar un modelo de cuenca que simule las aportaciones e infiltraciones a partir de registros históricos de precipitación y temperatura, para contar con un modelo superficial.

2.1 BASES DE DATOS

Una base de datos no es más que un almacenamiento de información recopilada que se encuentra de manera organizada. Por lo regular estas bases de datos se encuentran de manera electrónica y para recolectar la información necesaria se requirieron las bases de datos como son: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Climate Computing Project (CLICOM), Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS), Registro público de Derechos de Agua (REPDA).

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta etapa la zona de estudio se delimita por un Sistema de Información Geográfica (SIG), anteriormente obtendremos toda la información espacial necesaria de la zona en las bases de datos ya mencionadas, como lo será la ubicación geográfica (macro y micro localización), cuáles son los municipios que se encuentran dentro de la zona y se abastecen de este recurso, tipo y uso de suelo, geología, hidrología, regiones hidrológicas, necesarias para las consideraciones que se deberán tomar en cuenca en el estudio.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

2.3 GESTIÓN DE DATOS

Para la selección de estaciones tanto meteorológicas como hidrométricas, se obtienen las características espaciales como son longitud, latitud y elevación; años en estudio, en servicio y efectivos y, el porcentaje de datos vacíos que se presentan en la serie (Farfán, 2019).

Dentro de la gestión de datos usamos el método de polígonos de Thiessen donde se puede ver la influencia que tienen las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Se deberá tener una adecuada distribución de estaciones con la cuenca, ya que estas deben de cubrir la zona en su totalidad.

Las pruebas estadísticas en las estaciones son necesarias para comprobar que las series de precipitación con las que vamos a trabajar cumplan con las condiciones que sean homogéneas e independientes. Esto para demostrar que los datos meteorológicos son buenos y confiables, y para esto se debe aplicar un conjunto de pruebas de consistencia a las series de precipitación. Las pruebas que aplicaron para evaluar la homogeneidad de las series son: el test de Secuencias, test de Helmert y Cramer. Y para la independencia se aplica la prueba de los Límites de Anderson.

2.4 CÁLCULO DE LA EVAPORANSPIRACIÓN

Para el presente estudio se utilizó el método de Thorntwaite para calcular la evapotranspiración porque es para estudios de gran visión donde se relaciona la temperatura media mensual, la evapotranspiración calculada para meses estándar de 30 días con 12 horas de luz para cuatro áreas diferentes de los Estados Unidos y expresó esa relación según la ecuación donde se ve que la evapotranspiración tiene una relación exponencial con la temperatura.

2.5 MODELACIÓN SUPERFICIAL

El programa EVALUACIÓN de los recursos HIDRICOS (EVALHID) es un modelo informático para el desarrollo de modelos de precipitación escurrimiento (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos, dentro de los modelos de Evalhid se encuentra Témez.

Las ventajas que ofrece el modelo Témez ante zonas con cierta homogeneidad paramétrica es que, a pesar de ser un modelo de pocos parámetros, arroja resultados fiables.

Los 4 parámetros que controlan el modelo hidrológico superficial son: Hmax (Humedad máxima), C (Coeficiente de escurrimiento), Imax (Infiltración máxima), Alfa (Movimiento del agua en la celda subterránea).

2.6 CALIBRACIÓN SUPERFICIAL

El modelo hidrológico requiere de una calibración, quiere decir que se deben de ajustar los parámetros meteorológicos de una manera particular para cada sistema, esto se lograra modificando los valores numéricos de las ecuaciones de cada parámetro del modelo Témez (Hmax,C, Imax, Alfa).

Para lograr el proceso de calibración los datos ingresados en el modelo deberán tener un mismo periodo de tiempo en el cual vamos a lograr que los valores simulados (valores obtenidos del modelo) sean lo mas similar posible a los valores observados (valores

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

ingresados de estaciones hidrométricas seleccionadas) al obtener una correcta calibración del modelo, podremos acertar en que los resultados sean fiables y que el modelo es lo más parecido a la realidad.

Al iniciar la calibración el modelo ejecuta el algoritmo Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona (SCE-UA) para encontrar el conjunto de parámetros óptimos, este algoritmo varía los parámetros del modelo en cada iteración y hace que el archivo original del modelo se vaya modificando en cada iteración. Posteriormente el calibrador realiza una comparativa grafica de las series de datos simulados contra los datos observados haciendo tres clasificaciones en conjunto con la función objetivo (FO) para decidir si el ajuste que se realizo es el adecuado.

Los indicadores de ajuste del modelo son tres: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe modificado (Ln NS), Coeficiente de correlación de Pearson.

Los rangos para determinar la calidad de la modelación se presentan en la Tabla 1.

Table 1. Rangos de ajuste

Calidad de ajuste	NSE	r^2
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.90 < r^2 \leq 1.00$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.75 < r^2 \leq 0.89$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.50 < r^2 \leq 0.74$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$	$r^2 \leq 0.50$

3. RESULTADOS

3.1 LA ZONA DE ESTUDIO

Los acuíferos de Zamora y Cotija, se encuentran en la región Oeste de México, dentro del estado de Michoacán. El acuífero de Cotija se encuentra en el límite con el estado de Jalisco mientras que la zona hidrogeológica de Zamora se encuentra más ubicado a la porción nororiental del estado (Figura 1). Ambos acuíferos cubren un área total de 5026 km² y pertenecen a las regiones hidrológicas Lerma-Santiago por parte del acuífero de Zamora, ocupando las porciones alta y media de la subcuenca del río Duero y la region hidrológica del Balsas respecto al acuífero de Cotija que se encuentra en la cuenca del río Tepalcatepec y la subcuenca del río Itzicuaru. La delimitación geográfica de los acuíferos abarca un total de 24 municipios del estado de Michoacán siendo 14 del acuífero de Zamora y 10 restantes del acuífero de Cotija. El área agrícola es uno de los principales usos del suelo de la región, teniendo una similitud referente al tipo de suelo en ambos acuíferos. Se distingue mayormente, la presencia de Cambisol.

Los climas tropicales son los presentes en la zona de estudio, muy poco variables durante el transcurso del año, las temperaturas son altas, con focos de calor intensos en determinadas regiones, pero con una presencia de lluvias en todo el territorio.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

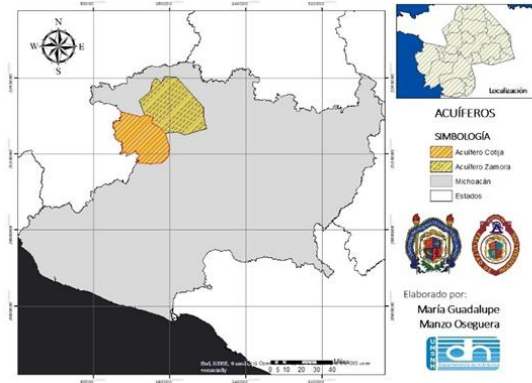


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

3.2 GESTIÓN DE DATOS

A partir de las bases de datos se recopila la información de las estaciones meteorológicas con datos de precipitación y temperatura. En la zona se detectaron 115 estaciones meteorológicas que tenían influencia directa en los acuíferos, mismas estaciones que se fueron discretizando al ser verificadas y validadas con las distintas pruebas estadísticas para tener información de calidad. Finalmente se quedaron solo 12 estaciones principales que lograron cubrir toda la zona de estudio, rectificando con los polígonos de Thiessen, la información con la que cuentan las estaciones meteorológicas principales es a partir del año 1980 hasta el 2014.

Las estaciones hidrométricas son necesarias e indispensables para la calibración del estudio alrededor del área estudiada se localizaron 33 estaciones, de las cuales se pudieron seleccionar solo 2, dado que son las únicas que se encuentran con información suficiente para poder realizar la calibración y no presentan afectación por extracción o aportación.

3.3 MODELACIÓN SUPERFICIAL

Para lograr la modelación y la calibración del estudio, se trabajo con el modelo Témez dentro del software Evalhid. Para llevarlas a cabo se generaron las cuencas tomando como puntos de salida las estaciones hidrométricas y los datos necesarios para la calibración será la información de precipitación, evapotranspiración y temperatura. Y para la calibración se requiere la información de las estaciones hidrométricas a los cuales les llamamos datos observados, estos permitirán ajustar los parámetros de Témez para que el modelo se aproxime lo más posible a la realidad.



Figura 2. Cuencas de calibración y puntos de salida

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

El proceso de calibración se realizó en 3 etapas, dadas las estaciones hidrométricas localizadas en la zona y una similitud hidrológica. Los datos de entrada de ambas cuencas a Evalhid, son el archivo tipo “Shp” con las microcuencas y el punto de desagüe, además de los datos de precipitación, temperatura y observados. En este proceso se repite en las dos cuencas de la (Figura 2), la tercera cuenca del acuífero de Cotija no cuenta con información de una estación hidrométrica para poder calibrarla, por lo que será necesario proceder a una similitud hidrológica, revisando la similitud entre cuencas y colocando parámetros ya calibrados.

3.4 CALIBRACIÓN DE LAS CUENCAS

En las cuencas que llevaremos a la calibración se generaron los sistemas de drenaje y se dividieron en microcuencas a partir del modelo digital de elevaciones (MDE). Los periodos de simulación para la calibración de la cuenca 8 (Figura 2) fue de 1980 a 2007, y de la cuenca 5 (Figura 2) de 1980 a 1999.

En ambas calibraciones se muestran rangos de calibraciones muy buenos, siendo esto indicadores de que los modelos son buenos (Tabla 1.) (Tabla 2.)

Tabla 1. Valores de funciones objetivo del algoritmo SCE-UA (cuenca 8)

Función Objetivo	Validación	Calibración
Valor FO	3.4327	3.2471
Nash	0.773	0.8224
Logaritmo de Nash	0.7651	0.517
Coefficiente de Pearson	0.9229	0.9114
Simetría	0.9715	0.9962

Tabla 2. Valores de funciones objetivo del algoritmo SCE-UA (cuenca 5)

Función Objetivo	Validación	Calibración
Valor FO	2.7265	3.3869
Nash	0.5587	0.7615
Logaritmo de Nash	0.4186	0.7429
Coefficiente de Pearson	0.7624	0.8832
Simetría	0.9866	0.9992

Los resultados de la calibración del modelo para la cuenca 8 se pueden apreciar de manera visual en las siguientes gráficas:

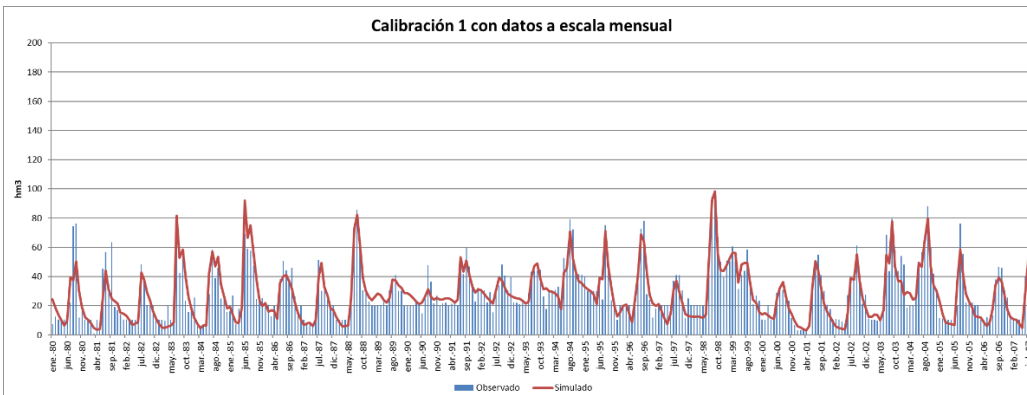


Figura 3. Escurrimientos mensuales resultantes (hm³) de la (Cuenca 8)

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

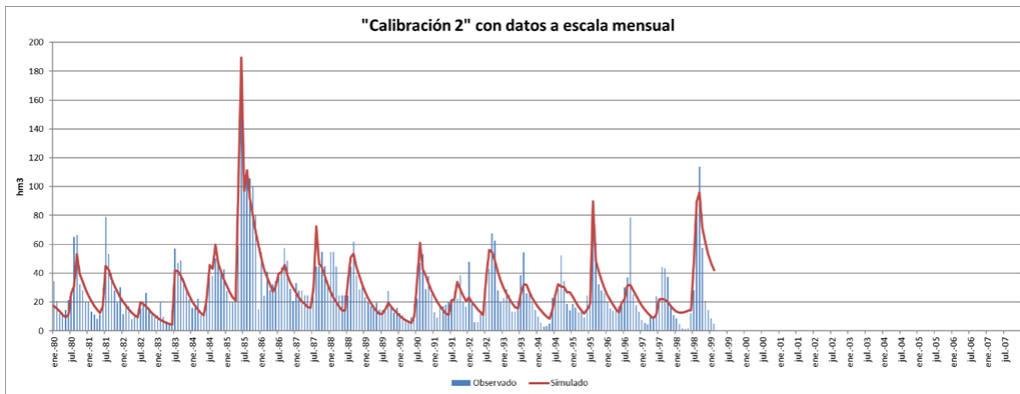


Figura 2. Escurrecimientos mensuales resultantes (hm³) de la (Cuenca 5)

3.5 SIMILITUD HIDROLÓGICA

Para esta similitud hidrológica, ya tenemos las cuencas anteriores calibradas, (Cuenca 5 y 8) por lo que ya tenemos el acceso a la información de su Humedad (Hmax), Coeficiente de escurrimiento (C), Infiltración (Imax) y Alfa. En este caso como no tenemos una estación hidrométrica con la cual podamos comparar respecto a datos observados, por este motivo no podemos realizar una calibración para la cuenca, entonces, se procede a hacer una similitud hidrológica, esta consiste realizar una comparación y para poder comparar las zonas y verificar que efectivamente se parecen hidrológicamente se comparan variables como usos de suelo, tipo de suelo, precipitaciones, temperaturas, climas etc. parámetros que relacionen que las zonas en las cuales se hará la similitud se parecen entre sí.

De esta manera, se obtienen los datos mensuales en Hm³ de las aportaciones en cada uno de los puntos de salida en los diferentes periodos de registros. A continuación, se presenta los parámetros correspondientes de humedad máxima, Infiltración máxima, el coeficiente de excedente C y el parámetro α de las cuencas.

Tabla 3. Parámetros de calibración del modelo hidrológico

Descripción	Hmax	C	Imax	Alfa
Cuenca 8	105	0.2	347	0.43
Cuenca 5	620	0.1	370	0.16
Similitud hidrológica	620	0.1	370	0.16

Ante los resultados es posible admitir bajo ciertas consideraciones que el modelo reproduce de manera apropiada los escurrimientos que se presentan naturalmente, permitiendo obtener los volúmenes de infiltración o recarga hacia los acuíferos como parte de los resultados acumulados del modelo.

4. CONCLUSIONES

Dada los escasos de agua en dulce en el planeta es muy importante hacer conciencia en la sociedad y cuidar de este vital líquido. La importancia de un buen manejo del recurso es algo esencial en nuestro país y en el planeta. Realizar un modelo hidrológico que simule las condiciones de un sistema real es una tarea compleja, debido principalmente a la escasez de información. Por ello es necesario llevar a cabo una etapa de gestión y validación de la información utilizada.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

La calibración realizada para obtener los resultados del balance hídrico fue una calibración satisfactoria, ya que los rangos de ajuste recomendados estuvieron por arriba de 0.5, se logró asemejar bastante bien los datos generados con los observados, lo cual nos confirma que estamos generando un modelo fiable, y los resultados obtenidos del balance hídrico se pueden considerar como resultados muy buenos ya que la información con la que se elaboró fue tratada y validada por las diferentes pruebas estadísticas, por lo que finalmente se pudo realizar una buena investigación pese a la falta de información necesaria para que dictaminemos que la investigación fue excelente.

Por la falta de información necesaria para el acuífero de Cotija, en el estudio de investigación se logró generar la serie de caudales, confiando en el trabajo de similitud hidrológica en comparación con la cuenca vecina, los caudales generados podrán usarse para estudios posteriores, pero se hace la recomendación que se logre colocar al menos una estación hidrométrica que pueda utilizarse para estudios próximos al acuífero.

Conforme ha avanzado el tiempo ha aumentado la demanda y las extracciones de aguas subterráneas en ambos acuíferos, anteriormente en el acuífero de Zamora se tenía registro de 179 pozos de extracción subterránea en el año de 1977, 45 años después se tienen concesionados 1022 pozos de extracción de los cuales se extraen 143.96 Hm³

REFERENCIAS

- [1] Cirelli, A. F. (2012). El agua: un recurso esencial. Química Viva, 147-170.
- [2] Farfán, M. d. (2019). Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [3] Gálvez, J. J. (2011). Aguas Subterráneas - Acuíferos. Global Water Partnership.
- [4] Mijares, J. A. (2006). Evaluación de los recursos hídricos. Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional (PHI).