

BALANCE HÍDRICO EN EL ACUÍFERO CUAUTITLAN-PACHUCA, MÉXICO: PROYECCIONES PARA 2021

ERIC GALINDO CASTILLO^{1,2}, ELENA MA. OTAZO SANCHEZ², L. RAYMUNDO REYES GUTIÉRREZ², SANTIAGO M. ARELLANO ISLAS¹, ALBERTO GORDILLO MARTÍNEZ², CESAR A. GONZÁLEZ RAMÍREZ²

1 Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, Emilio Carranza #101 Col. Carlos Robirosa. CP 42080. Pachuca Hidalgo. México.

2 Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Carretera Pachuca Tulancingo km 4.5 Ciudad Universitaria. CP 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo. México

Emails: eric.galindo.c@gmail.com ; elenaotazo@yahoo.com, lreyes@uaeh.reduaeh.mx, sarellano@ceaa-hidalgo.gob.mx, gordillo@uaeh.reduaeh.mx, ccr_gonzalez@yahoo.com .

RESUMEN

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las más densamente pobladas del planeta. Se analizó el efecto del crecimiento de las manchas urbanas en la disminución de la infiltración de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (2011-2021). Para calcular su balance hídrico se consideraron patrones de precipitación pluvial, temperatura, evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración a partir de datos de estaciones meteorológicas y su interpolación con el método de *Kriging*, generando imágenes raster. Se calculó el balance hídrico para 2011 con un déficit de $-194,97 \text{ hm}^3/\text{año}$ basado en un coeficiente de infiltración promedio. Con valores asignados según uso del suelo y crecimiento de la mancha urbana previstos para 2021, el déficit aumentará a $-236,29 \text{ hm}^3/\text{año}$. El crecimiento urbano y su influencia en la infiltración de agua aportan elementos para una política de explotación más eficiente del acuífero.

Palabras clave: Infiltración, escorrentía superficial, SIG, *Kriging*, balance hídrico, manchas urbanas.

BASIN WATER BALANCE ON THE AQUIFER CUAUTITLAN – PACHUCA, MEXICO: 2021 PREDICTION

ABSTRACT

The Metropolitan Area of Mexico (ZMVM) is one of the most densely populated of the planet. This work analyzed the effect of the urban sprawl growth in reducing infiltration of water into the aquifer Cuautitlán-Pachuca (2011 - 2021). To calculate its water balance, patterns of rainfall, temperature, evapotranspiration, runoff and infiltration from meteorological data and *Kriging* interpolation method for generating raster images were considered. We calculated the water balance for 2011 with a deficit of $-194.97 \text{ hm}^3/\text{year}$ based on average infiltration coefficient. Having

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlán Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

assigned values according to land use and urban sprawl planned for 2021, the deficit increased to -236.29 hm³/year. Urban growth and its influence on water infiltration provide elements for a more efficient operating policy of the aquifer.

Keywords: Infiltration, stream flow, GIS, Kriging, water balance, urban sprawl.

1. Introducción

En el mundo el 97% del agua dulce no congelada se encuentra almacenada en acuíferos, los cuales proporcionan agua potable al 32,5% de la población mundial (UNESCO, 2009). Sin embargo en las zonas Centro y Norte de México este recurso se está utilizando tan aceleradamente que impide que los acuíferos se recarguen, convirtiendo el agua subterránea en un recurso inaccesible. Por tal motivo, es necesario conocer las características de los acuíferos, así como actualizar regularmente sus índices de recuperación y recarga para poder lograr una explotación sustentable de los mismos, así como una adecuada planeación del recurso, marcando las amenazas que pueden poner en riesgo su aprovechamiento.

La ZMVM presenta grandes problemas de abasto de agua. El acuífero Cuautitlán-Pachuca (clave 1508) (CONAGUA, 2007) es un ejemplo de sobreexplotación irracional, ya que soporta la demanda de una de las mayores ciudades del mundo. Provee de agua a los más de diez millones de habitantes, industrias y agricultores que se encuentran dentro de sus límites. Por tanto, es un caso único y muy representativo del efecto del "gigantismo" urbano sobre las aguas subterráneas.

Este acuífero es uno de los más importantes de esta región; con una superficie aproximada de 4.349 km², representa el 23,6% de la Cuenca del Valle de México y es la principal fuente de abastecimiento de la zona norte de la Ciudad de México. Las principales poblaciones demandantes de agua subterránea son dos importantes zonas metropolitanas: Pachuca de Soto, con una tasa de crecimiento poblacional medio anual del 2,8% -de las más elevadas del país- y la Ciudad de México, con una tasa del 0,8% (CONAPO, 2005). Esto ha traído graves problemas ambientales ya que la deforestación, la erosión de suelos y la pérdida de zonas de recarga por el crecimiento urbano impiden la retención e infiltración del agua, provocando su escasez. Para el año 2020 se prevé que se necesitarán 37 mil hectáreas adicionales para albergar a la población urbana de estas dos ciudades (Garza, 2006).

La única fuente de recarga del acuífero es el agua de lluvia. Su superficie presenta una fisiografía característica de la parte central de México y su extenso valle es ideal para la generación de nuevos desarrollos habitacionales. Geológicamente el área está formada por depósitos aluviales y lacustres -principalmente gravas y arenas- con una alta permeabilidad, interrumpidas ocasionalmente por conos cineríticos y derrames de lavas de tipo vulcanitas básicas e intermedias (Mooser *et al.*, 1992). Éstas conforman las sierras que rodean al valle y algunos lomeríos dentro de la misma cuenca (Mooser, 1961, 1993 y 1996). La [figura 1](#) muestra la localización del acuífero.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlán Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

Gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han logrado avances en la información cartográfica, debido al fácil manejo de datos referenciados, los cuales se pueden representar como imágenes (Bosque, 1992). Utilizando estas herramientas es posible estudiar con mayor certeza la situación del acuífero, sobre el que existen pocos informes técnicos en los que se haya calculado con precisión la disponibilidad de agua y tampoco se han utilizado los SIG (CONAGUA, 2002; Cruickshank y Martínez, 2005; CEAA, 2006; CONAGUA, 2009).

2. Revisión bibliográfica

En los últimos diez años se realizaron diferentes informes técnicos acerca del acuífero Cuautitlán-Pachuca debido a la preocupación de los gobiernos por la disponibilidad del agua subterránea.

En el año 2002 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó un estudio para determinar la disponibilidad de agua en el acuífero. En este informe se estima una recarga media anual de 202,96 hm³/año, junto con una extracción de 243,39 hm³/año, lo que resulta en un déficit de 40 hm³/año y confirma la sobreexplotación de este acuífero (CONAGUA, 2002).

Debido a esta situación, la CONAGUA y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) elaboraron el "Programa 2005-2015 de conservación y mantenimiento del sistema del plan de acción inmediata (PAI)" para regular el suministro de agua en la Ciudad de México. En este documento se estimó un aumento de los caudales de extracción del agua por bombeo en ese año (2005), el cual asciende a 483 hm³/año y se utilizó el mismo valor de recarga recogido en el estudio anterior, 202,96 hm³/año (CONAGUA, 2002). Por tanto, el déficit de agua calculado es de 280 hm³/año (Cruickshank y Martínez, 2005). Tan sólo en tres años el déficit aumentó en un 700%, debido, principalmente, al rápido crecimiento de las manchas urbanas que conllevó un aumento del número de perforaciones ilegales y de los caudales de extracción para cubrir la mayor demanda de agua de la población.

El Estado de Hidalgo, a través de la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado (CEAA), realizó el estudio geohidrológico del acuífero Cuautitlán-Pachuca entre los años 2006 y 2007 que contempló la recopilación de información, exploración geofísica, balance y modelado matemático del acuífero (CEAA, 2006). En este documento se utilizó un coeficiente de infiltración promedio de 0,21 para estimar la recarga del acuífero, lo que resulta una recarga media de 530,1 hm³/año y una extracción de 747,9 hm³/año, resultando un déficit de 217,8 hm³/año.

En el año 2009 la CONAGUA realizó una actualización del censo de pozos de bombeo en el área con el fin de tener un mayor control de la cantidad de agua que se extrae del acuífero y actualizar la información de los aprovechamientos subterráneos. Se obtuvo así un total de 1.098 pozos en el acuífero, que extraen un caudal del orden de 546,69 hm³/año, 201,21 hm³/año menos que en el estudio anterior. Como complemento de esta información, en el 2009 se realizó una actualización de la disponibilidad del acuífero utilizando un coeficiente infiltración promedio de

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

0,14 para toda el área del acuífero y con ese dato se calculó una recarga media anual de 356,7 hm³/año, muy diferente a la calculada en los estudios anteriores (CONAGUA, 2009).

Los trabajos anteriores dieron resultados de coeficientes de infiltración con valores diferentes. Esto originó una gran dispersión de datos registrados y, por tanto, inexactitudes en el cálculo del caudal de recarga del acuífero. Este error afecta directamente al valor calculado para la disponibilidad de agua. Esto es muy grave ya que este resultado ha servido como base para establecer las políticas de explotación y estimar las afectaciones que se tendrán a futuro. Estos errores son debidos a consideraciones generalizadas sin una base real: a) en todas las zonas se consideraron valores idénticos de coeficientes de infiltración, sin considerar las diferentes características del suelo; b) no se particularizan para cada zona los datos utilizados en sus cálculos para la precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial. También se asume un solo valor promedio para todo el acuífero.

El objetivo de este trabajo es evaluar el grado de sobreexplotación real y actual del acuífero, mediante un cálculo más preciso de la cantidad de agua de lluvia que se infiltra, evapora y escurre en la zona de estudio, a través de imágenes raster que pueden ser generadas a partir de datos de estaciones meteorológicas. Con estos resultados se estiman las afectaciones en la recarga del acuífero que se tendrán a futuro por el crecimiento acelerado de las manchas urbanas.

El cambio de uso de suelo por el crecimiento urbano y su influencia en los patrones de escorrentía superficial e infiltración de agua sobre el acuífero no han sido estudiados previamente y aportan elementos para una política de explotación del acuífero más eficiente, a saber: ajustes en el ordenamiento territorial de la zona, planes de manejo del agua, políticas de restricción en cambios de uso de suelo, entre otros.

3. Materiales, datos y métodos

La metodología general seguida en este trabajo se muestra en el esquema de la [figura 2](#), en donde se sitúan, consecutivamente, los datos utilizados y las imágenes raster generadas.

Se recopilan datos de precipitación y temperatura de estaciones meteorológicas desde 1980 hasta 2006. Esta información se incorpora al *software* ArcGIS 9.2 y se generan imágenes raster del área del acuífero; se aplica el método de *Kriging* para interpolar la información de las variables analizadas. Este método de análisis geoestadístico ha probado ser útil y popular en muchos campos. Se basa en la premisa de que la variación espacial de una variable aleatoria es homogénea; tiene como base científica el semivariograma para definir la varianza entre dos observaciones como una función de la distancia que las separa (Journel, 1983). El origen de este método está en la minería, pero también se ha aplicado para estimar la distribución de variables espaciales como la precipitación y la temperatura en determinadas áreas (Hudson y Wackernagel, 1994, Goovaerts, 1997 y 2000, Teegavarapu y Chandramouli, 2005, Teegavarapu, 2007).

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

El método de *Kriging* se basa en el semivariograma, que es la media de los cuadrados de las diferencias entre pares de muestras separados por una distancia **h**, y la ecuación para calcular el semivariograma es la siguiente:

$$\gamma(h) = n/2 \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (Ec. 1)$$

Donde n es el número de muestras; $Z(x_i)$ es el valor de la variable regionalizada de interés en el punto i y $Z(x_i + h)$ es el valor a la distancia x+h.

En este caso se utilizan diferentes variaciones del *Kriging* (lineal, gaussiano, y circular) con el fin de obtener una mayor correlación entre los datos calculados y los datos observados. A partir de éstas se genera una imagen final con los valores medios anuales de precipitación y temperatura.

Para obtener el balance del área, se utiliza la siguiente ecuación general:

$$P = I + ETR + Es \quad (Ec. 2)$$

Donde P es la precipitación; ETR es la evapotranspiración real; Es es la escorrentía superficial e I la infiltración.

Para evaluar la ETR del área de estudio se aplica el método de Hargreaves y Samani (1985), que utiliza el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), basado en datos de radiación solar y temperatura, aplicando la siguiente ecuación:

$$ETP = 0.0135(T_{med} + 17.78)R_s \quad (Ec. 3)$$

Donde: ETP es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día; T_{med} es la temperatura media en °C y R_s es la radiación solar incidente, convertida en mm/día.

La radiación solar incidente se obtuvo al aplicar la ecuación de Samani (2000), la cual se muestra a continuación:

$$R_s = R_0 * KT * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (Ec. 4)$$

En donde: R_0 es la radiación solar extraterrestre (tomada de la [tabla 1](#)); KT el coeficiente empírico, que se asume de 0,162, ya que el área de estudio se considera una región interior y este valor es el recomendado para tal efecto (Samani, 2000); T_{max} y T_{min} son las temperaturas diarias máxima y mínima, respectivamente.

Los valores calculados de ETP nos indican la cantidad de agua que se puede evapotranspirar en óptimas condiciones y, generalmente, son siempre mayores a la

evapotranspiración real (ETR). Por tal motivo, se comparan los valores de precipitación con los resultados obtenidos de ETP, mes a mes, con lo que se estiman los valores de evapotranspiración real (ETR) para cada año. Con estos datos se obtuvo el coeficiente de evapotranspiración, despejándolo de la siguiente ecuación:

$$ETR = ETP * K_{ET} \quad (Ec. 5)$$

Donde: ETR es la evapotranspiración real; ETP es la evapotranspiración potencial y K_{ET} es un coeficiente que se determina para cada una de las estaciones a partir de los datos de mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial. Se utiliza el *software* ArcGIS 9.2 para generar la imagen raster de ETR media anual del acuífero, aplicando el método de *Kriging*.

La gran diferencia entre el establecimiento de un coeficiente de infiltración promedio para toda el área y esta metodología radica en el cálculo del coeficiente de escorrentía superficial (k), que se realiza con la ayuda de modelos digitales de elevación del terreno y cartografía digital que contenga el uso y la textura del suelo. Esta información fue obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2005). Se asignan los valores de k a cada área, con base en las tablas de *coeficientes de Prevert* según diferentes características del terreno (Treviño *et al*, 2002) que aplican tres condiciones diferentes: uso del suelo, textura y pendiente. Sin embargo, estas tablas no contienen valores para las zonas urbanas y, por tal motivo, fue necesario complementarla con los coeficientes registrados por Chow *et al*. (1993). La combinación de estas dos opciones y los valores utilizados en este trabajo se indican en la [tabla 2](#). Una vez caracterizada el área de estudio con esta información, se genera una imagen raster de los coeficientes de escorrentía superficial, la cual se multiplica por los valores correspondientes de precipitación media anual, obteniendo, así, la escorrentía superficial media anual del acuífero.

Para obtener la imagen raster de infiltración se aplicó el álgebra de mapas, despejando la infiltración de la ecuación general (Ec. 2). A la imagen de precipitación se le restan los valores de las imágenes de evapotranspiración y escorrentía superficial, dando como resultado los volúmenes medios anuales de infiltración. Esta última imagen se divide entre la precipitación media anual y se obtienen los coeficientes de infiltración específicos para cada área del acuífero.

Para obtener el caudal medio anual neto que se infiltra al acuífero fue necesario zonificar el área de estudio en una serie de polígonos de acuerdo a la infiltración de cada zona, y aplicar la siguiente fórmula:

$$\sum_{i=1}^n A_i \times \frac{I_i}{1000} = I_{Neta} \quad (Ec. 6)$$

En donde n es el total de polígonos que se obtienen; A_i es el área del polígono en m^2 ; I_i es la infiltración media anual en mm/año e I_{Neta} es la infiltración media anual neta del acuífero en $m^3/año$.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

Con esta información se obtuvo la disponibilidad del acuífero y se resta la extracción del agua subterránea a la recarga, mediante la siguiente ecuación:

$$Disp = E_{ac} - S_{ac} \quad (Ec. 7)$$

En donde *Disp* es la disponibilidad del acuífero; E_{ac} son las entradas de agua que tiene el acuífero (recarga) y S_{ac} las salidas de agua (extracción). Se compara la recarga media anual obtenida en este trabajo con los diversos valores de coeficientes de infiltración promedio calculados en estudios con el fin de mostrar las inexactitudes con el presente cálculo, en el que se utilizan coeficientes de infiltración variables.

Se elaboró un mapa figura del total de las zonas que serán urbanizadas para el año 2021 ([figura 11](#)), basado en los datos de población y vivienda obtenidos del Anuario Estadístico del INEGI (2008), los datos de crecimiento poblacional del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2005) y la digitalización de las manchas urbanas de las Cartas Topográficas, escala 1:50.000 (INEGI, 2005), con las claves: 14a18, e14a19, e14a28, e14a29, e14a38, e14b11, e14b12, e14b21, f14d81 y f14d82. En este mapa se recogen un total de 69.000 ha, donde se incluyen las 37 mil nuevas hectáreas previstas para las zonas metropolitanas (Garza, 2006) y la proyección urbana del proyecto "PLATAH", planeado por el Gobierno del Estado de Hidalgo precisamente en el área del acuífero, consistente en la construcción de un aeropuerto de carga, con gran extensión de almacenes y nuevas unidades habitacionales, que cubrirá un área aproximada de 32 mil hectáreas adicionales (GEH, 2008; ACUACORP, 2008).

Con estas consideraciones, se genera la imagen raster del coeficiente de escorrentía superficial y la de la infiltración para el año 2021 con el fin de determinar las pérdidas que se tendrán por el cambio de usos de suelo y el crecimiento de las manchas urbanas.

4. Resultados

Primeramente se generaron imágenes raster de parámetros meteorológicos que permiten determinar la recarga de agua de lluvia del acuífero. La temperatura media anual varía entre los 20°C a los 10°C; los valores mínimos se presentan en los extremos del acuífero, mientras que en la parte central el valor promedio es de 15°C. El máximo valor (20 °C) se encuentra en las cercanías a la Ciudad de México. La [figura 3](#) muestra la distribución de las isotermas medias anuales calculadas con el método de *Kriging*. Estos datos y los obtenidos por las estaciones meteorológicas tienen una correlación del orden de $R^2 = 0.871$.

Los valores de precipitación calculados y experimentales presentan una correlación mayor ($R^2 = 0.966$) que la anterior. En la [figura 4](#) se muestran las isoyetas de las precipitaciones medias anuales calculadas por el método de *Kriging* y en ella se aprecia que las mayores precipitaciones se localizan en el Suroeste del acuífero. Estos valores disminuyen hacia la parte central, hasta llegar a los 500 mm/año y aumenta hacia el noreste, donde alcanzan valores que oscilan entre los 700 a 800

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

mm/año. Se observa que la mayor recarga proviene de las partes altas del acuífero, principalmente al Suroeste y, en menor medida, en la parte Noreste.

La [figura 5](#) muestra la imagen de ETR calculada, en la cual podemos apreciar que los valores varían de 241 y 625 mm/año. Los mayores valores se presentan en la parte Suroeste del acuífero, debido a que en esta zona las precipitaciones son mayores, a diferencia de la parte Noreste donde se localizan los menores valores y las precipitaciones disminuyen considerablemente. Estos valores de ETR corresponden al 34%-78% de los valores de precipitación ([figura 4](#)). Los resultados obtenidos son cercanos a los registrados en otros estudios llevados a cabo en la misma zona (CONAGUA, 2002) que estiman una pérdida de 50%-75% de la precipitación mediante la ETR.

Para asignar los coeficientes de escorrentía superficial de cada zona se utilizan los valores de la [tabla 2](#) y se generó la imagen raster correspondiente ([figura 6](#)). En ésta se aprecian bajos valores de estos coeficientes para toda el área del acuífero, debido a que la topografía del terreno es casi plana. Los valores más altos representan a las zonas urbanas, ya que se consideran zonas con baja vegetación.

A partir de los datos del coeficiente de escorrentía superficial y con los datos de la precipitación media anual, se genera la imagen raster de la escorrentía superficial media anual ([figura 7](#)). En ella se observa que dichos valores varían entre los 50 a los 600 mm/año. Los datos que presentan una baja escorrentía superficial representan las zonas en donde la infiltración del agua de lluvia es mayor.

La imagen de infiltración ([figura 8](#)) es creada a partir de la ecuación general de balance (*Ec. 2*). En ella se observa que los mayores valores (151 a 500 mm/año) se localizan en el extremo Suroeste del acuífero y, en menor medida (176 a 375 mm/año), en el extremo Noreste. Los valores de infiltración van descendiendo hasta llegar a la planicie (parte central del acuífero). Este fenómeno se debe a que los valores de infiltración son afectados directamente por la precipitación que, al igual que la infiltración, es mayor en los extremos y menor en la parte de la planicie.

Con el fin de detectar las zonas que presentan mayor infiltración, la [figura 8](#) se dividió entre la precipitación, dando como resultado la imagen del coeficiente de infiltración ([figura 9](#)), donde se observa que la mayor parte del acuífero presenta valores entre 0,02 y 0,15. Se destacan las zonas con menor coeficiente de infiltración que coinciden con las manchas urbanas.

Se observa que la principal fuente de abastecimiento del acuífero se sitúa en las sierras de los extremos Suroeste y Noreste del acuífero, donde se dan las mayores precipitaciones, este último en menor proporción ([figura 8](#)). Por ello, los mayores valores de infiltración se obtienen en estas zonas. Sin embargo, esto no es real. El agua infiltrada en las sierras forma escorrentías superficiales y subterráneas debido a la pendiente del terreno y a la baja permeabilidad de las rocas que se encuentran en su subsuelo. Por tanto, la verdadera recarga ocurre en la planicie, donde el agua se infiltra a través de los materiales permeables que la constituyen, a pesar de que los datos registrados en este trabajo muestren valores más bajos de infiltración. Ello explica que la totalidad de los pozos de bombeo se localicen en esta zona, como se aprecia en la [figura 10](#).

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

Al aplicar la ecuación para el cálculo del caudal medio (Ec. 6) sobre la imagen raster de la [figura 8](#) se obtiene una infiltración neta de 351,72 hm³/año. Según los últimos datos obtenidos por la CONAGUA (2009), a través de los pozos se extrae un caudal de 546,69 hm³/año. Con estos datos es posible calcular la disponibilidad del acuífero. Teniendo en cuenta que su única recarga es la infiltración pluvial y considerando que es una cuenca endorreica, las únicas salidas corresponden al caudal de los pozos localizados en el mismo. De esta forma se calcula un déficit en el balance hídrico de -194,97 hm³/año ([figura 10](#)) y, por tanto, el acuífero está sobreexplotado.

Con la misma metodología se predice el comportamiento del acuífero para el año 2021, teniendo en cuenta el aumento de las zonas urbanas. Se genera un mapa digitalizado con las manchas urbanas según el crecimiento previsto para el año 2021. Como se muestra en la [figura 11](#), el estimado del aumento en urbanización resultó de 62 mil hectáreas en lugar de 69 mil, algo menor a los registrados por Garza (2006), GEH (2008) y ACUACORP (2008). Con este mapa se genera la imagen raster de los coeficientes de escorrentía superficial para ese año, asignando los mismos valores de *coeficientes de Prevert* y de *Chow* (Treviño *et al*, 2002; Chow *et al*, 1993) utilizados en los cálculos anteriores. El coeficiente de escorrentía superficial promedio en el área resultó de 0.45. Para el año 2021 aumentará, según este trabajo, a 0,57, debido a la pérdida de vegetación al cambiar de una zona rural a urbana ([figura 12](#)).

Para estimar el efecto del crecimiento de la mancha urbana para el 2021 en la recarga del acuífero, se realiza la predicción variando sólo ese aspecto, sin incluir cambios en las condiciones meteorológicas. Con la imagen raster de escorrentía de la [figura 12](#) se calcula la infiltración neta que tendrá el acuífero para ese año, generando la imagen raster correspondiente ([figura 13](#)); con las mismas imágenes generadas de ETR ([figura 5](#)) y la de la precipitación media anual ([figura 4](#)) se obtiene una recarga de 310,4 hm³/año, lo que significa una reducción de 41,3 hm³/año debida al crecimiento de las manchas urbanas, que representa el 11,71% de la recarga actual del acuífero.

5. Discusión y valoración de hallazgos

El dato de la recarga media anual calculada en el presente trabajo (381,2 hm³/año) se compara con los valores de coeficientes de infiltración promedios calculados en anteriores estudios técnicos. Esto dio como resultado diferencias significativas que se muestran en la [tabla 3](#), junto con el coeficiente de infiltración utilizado en cada uno de esos estudios. Estas variaciones son debidas a que existen zonas con características particulares, como son los valores de precipitación, la pendiente, la cobertura vegetal, etc., por lo que es inadecuado generalizar un valor de infiltración único para todo el acuífero. Por esta causa se originan errores en el cálculo de la recarga que minimizan las políticas que regulan la extracción de las aguas subterráneas en el acuífero. Han existido errores en el cálculo de la recarga tan altos como del 50,72% registrado en el estudio realizado durante el año 2006 (CEAA, 2006). Cabe mencionar que el coeficiente de infiltración ha sido ajustado recientemente por la CONAGUA hasta obtener a la fecha una diferencia del 1,42% respecto al estudio realizado en el año 2009, que implica una diferencia cercana a 5 millones de metros cúbicos al año.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se registra la infiltración media anual neta del acuífero considerando los coeficientes de escorrentía superficial y los datos meteorológicos específicos para cada zona del área de estudio, a diferencia de informes anteriores en los que sólo se utiliza un dato único para todo el acuífero y, por ello, se disminuye considerablemente la inexactitud del cálculo de la recarga.

Se generan las imágenes raster de temperatura, precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial para calcular la infiltración (entrada), y con los datos de los caudales de extracción de los pozos (salida) se obtiene el balance hídrico y, con ello, se evalúa la sobreexplotación a que está sometido del acuífero.

Con el mapa de coeficientes de infiltración ([figura 9](#)) se identifican las principales zonas de recarga y, con ello, se pueden generar programas para la protección de las mismas. Con los resultados obtenidos en este trabajo se demuestra la importancia de utilizar SIG en el campo de la hidrogeología, ya que permiten determinar los parámetros de la recarga con mayor exactitud y visualizar las zonas de mayor importancia. Un claro ejemplo de esto es la simulación obtenida para el año 2021, basada en el crecimiento de las manchas urbanas, que afectará en gran medida la recarga del acuífero y agrava aún más la sobreexplotación que actualmente presenta. Por cada 5.280 ha con nuevas zonas urbanas se pierde un 1% de la recarga actual del acuífero.

Por todo lo anterior, es indispensable que dentro de los programas de desarrollo urbano se establezcan medidas para recuperar el acuífero, como son la protección de zonas de recarga y la construcción de pozos de infiltración.

Agradecimientos

A la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo y al Dr. Saúl Miranda L. por la información técnica proporcionada. EGC agradece al CONACYT por la beca doctoral otorgada.

Referencias bibliográficas

ACUACORP de Hidalgo (2008): *Resumen ejecutivo del Manifiesto de Impacto Ambiental en su modalidad regional del proyecto denominado: Nuevo aeropuerto Ing. Juan Guillermo Villasana*, México, SEMARNAT, Disponible en:

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/hgo/resumenes/2008/13HI2008V0010.pdf>

Allen, R.G.; Pereira, L.S. y Raes, D. (1998): *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage, 56, Disponible en:

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlán Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

- Bosque Sendra, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid. Ediciones Rialp.
- CEAA (2006): "Estudio geohidrológico del Valle Pachuca – Tizayuca", México, Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado, Informe Técnico.
- Chow, J.; Watson, J.; Lowenthal, D.; Solomon, P; Magliano, K.; Ziman, S. y Richards; L. (1993): "PM10 and PM2.5 composition in California's San Joaquin Valley". *Aerosol Sci. Technol.*, 18, pp. 105-128.
- CONAGUA (2002): *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, estados de México e Hidalgo*, México, Comisión Nacional del Agua, Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_1508.pdf
- CONAGUA (2007): *Tabla de acuíferos, con información de Región Hidrológico-Administrativa, clave, nombre, región y subregión hidrológica, cuenca, así como sus principales características para el cálculo de disponibilidad o déficit al 31 de diciembre de 2007*, México, Comisión Nacional del Agua, Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/TM_ACUIFEROS.xls
- CONAGUA (2009): *Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión. (Tercera Sección)*, México, Comisión Nacional del Agua, Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DOF28agosto2009b.pdf>
- CONAPO (2005): *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*, México, Consejo Nacional de Población, Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/dzm2005/zm_2005.pdf
- Cruickshank, V. y Martínez, P. JL. (2005): "PAI UNAM Programa 2005-2015 de conservación y mantenimiento del sistema del plan de acción inmediata", México, Instituto de Ingeniería de la UNAM, Informe Técnico.
- Garza, G. (2006): *Macroeconomía de la Ciudad de México*, México, Urban Age Mexico City Conference. Disponible en: http://www.urban-age.net/0_downloads/pdf_presentations/Mexico/C-1Garza.pdf
- GEH (2008): *Presentación del Proyecto PLATAH*, México, Secretaría de Desarrollo Económico, Gobierno del Estado de Hidalgo, Disponible en: http://www.imipachuca.org.mx/convoca/foro8/des_eco_hgo.pdf
- Goovaerts, P. (1997): *Geostatistics for natural resources evaluation*, New York, Oxford University Press.
- Goovaerts, P. (2000): "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall", *Journal of Hydrology*, 228, pp. 113-129.
- Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A. (1985): "Reference crop evapotranspiration from temperature", *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), pp. 96-99.
- Hudson, G. y Wackernagel, H. (1994): "Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland", *International Journal of Climatology*, 14, pp. 77-91.
- INEGI (2005): *Cartas Topográficas 1:50,000*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Disponible en: www.inegi.gob.mx
- INEGI (2008): *II Censo de Población y Vivienda 2005. Principales resultados por localidad 2005. Estados Unidos Mexicanos*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Disponible en: www.inegi.gob.mx

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

Journel, A. G. (1983): "Nonparametric estimation of spatial distributions", *Math. Geol.*, 15, pp.445–468.

Mosser, F. (1961): "Informe sobre la geología de la Cuenca del Valle de México y zonas colindantes", México, Oficina de Estudios Especiales de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, Informe Técnico.

Mooser, F., Montiel-Rosado A y Zuñiga-Arista A. (1992): "Experiencias geotécnicas en la zona poniente del Valle de México" *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, pp. 5-16.

Mosser, F., (1993): "Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México", *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra*, pp. 68-84.

Mosser, F., (1996): "Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos: mapas, 1:125,000", México, Comisión Federal de Electricidad, Informe Técnico.

Samani, Z. (2000): "Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 4, pp. 265-267.

Teegavarapu, R.S.V. y Chandramouli, V. (2005): "Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records", *Journal of Hydrology*, 312, pp. 191–206.

Teegavarapu, R. S.V. (2007): "Use of universal function approximation in variance-dependent surface interpolation method: An application in hydrology", *Journal of Hydrology*, 332, pp. 16– 29.

Treviño G.; Eduardo J.; Muñoz R., C. A.; Cavazos, C. y Barajas Ch., L. (2002): "Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas", *Revista Ciencia UANL*, 3, 2002, pp. 351-356.

UNESCO (2009): *Water in a changing world*. The United Nations World Water Development, Report 3, France, Organization UNESCO, Disponible en <http://publishing.unesco.org/>

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

TABLAS

Tabla 1. Radiación solar extraterrestre en MJulios/m²/día.

LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
20	26.80	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6

Fuente. Allen *et al.* (1998)

Tabla 2. Coeficientes de escorrentía superficial.

Uso de Suelo	Pendiente	Textura		
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	0 - 5	0.10	0.30	0.40
	5 - 10	0.25	0.36	0.50
	10 - 30	0.30	0.40	0.60
	> 30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0 - 5	0.15	0.35	0.45
	5 - 10	0.30	0.40	0.55
	10 - 30	0.35	0.45	0.65
	> 30	0.37	0.47	0.68
Agricultura	0 - 5	0.30	0.50	0.60
	5 - 10	0.40	0.66	0.70
	10 - 30	0.50	0.70	0.80
	> 30	0.53	0.74	0.84
Zona Urbana	0 - 5	0.70	0.81	0.92
	5 - 10	0.76	0.85	0.93
	10 - 30	0.88	0.91	0.94
	> 30	0.95	0.95	0.95

Fuente. Treviño *et al.* (2002) y Chow *et al.* (1993)

Tabla 3. Comparación de los valores de recarga estimada anteriormente

Año del estudio	Coefficiente de infiltración promedio	Valor estimado de la infiltración (hm ³ /año)	Diferencia con respecto al valor calculado (hm ³ /año)	%
2002 ¹ - 2005 ²	0.08	202.96	148.76	42.30%
2006 ³	0.21	530.10	178.38	50.72%
2009 ⁴	0.14	356.70	4.98	1.42%
Valor Calculado ⁵	Variable	351.72	----	----

Fuente. 1. CONAGUA (2002); 2. Cruickshank y Martínez (2005); 3. CEEA (2006), 4. CONAGUA (2009); 5. Elaboración propia

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

FIGURAS

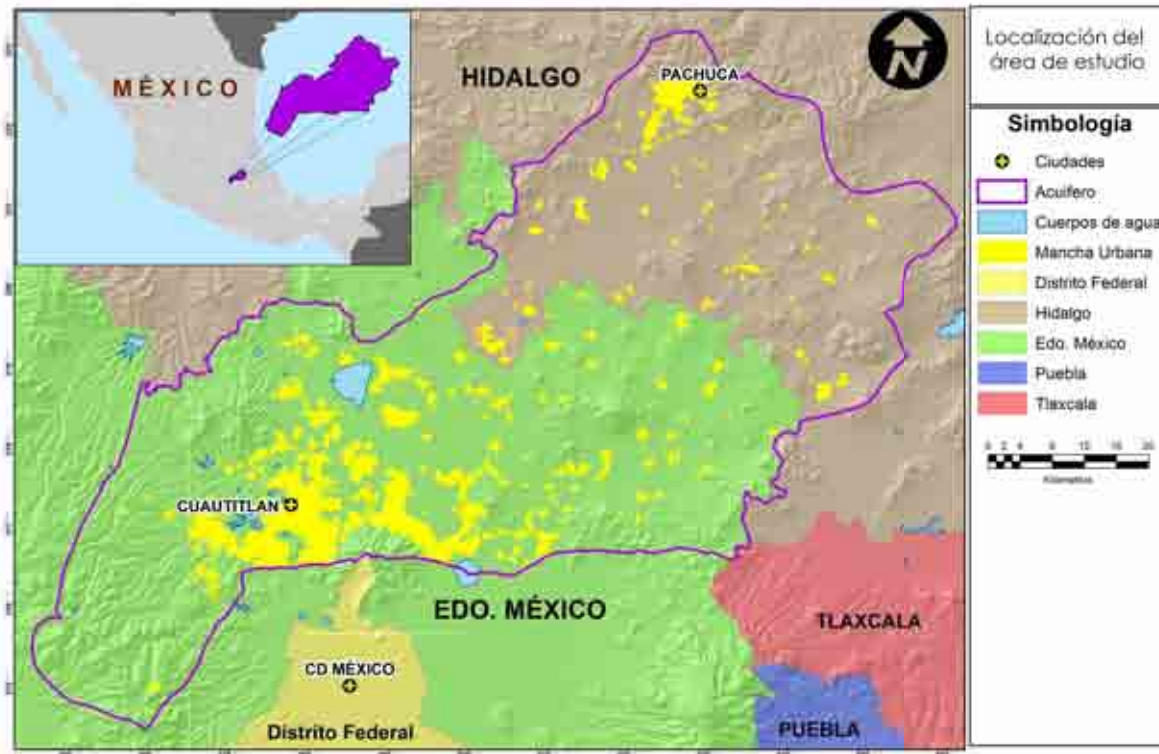


Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

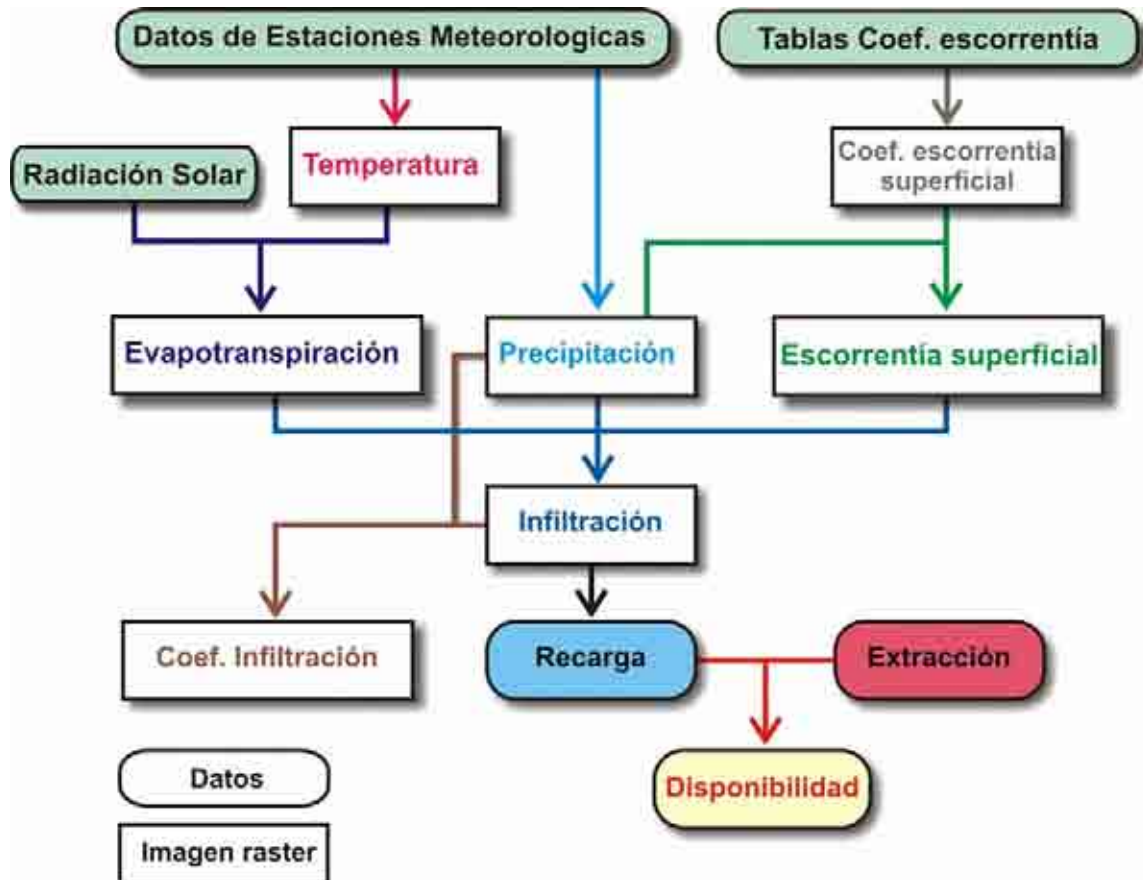


Figura 2. Esquema del balance hídrico a través de imágenes raster.

Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

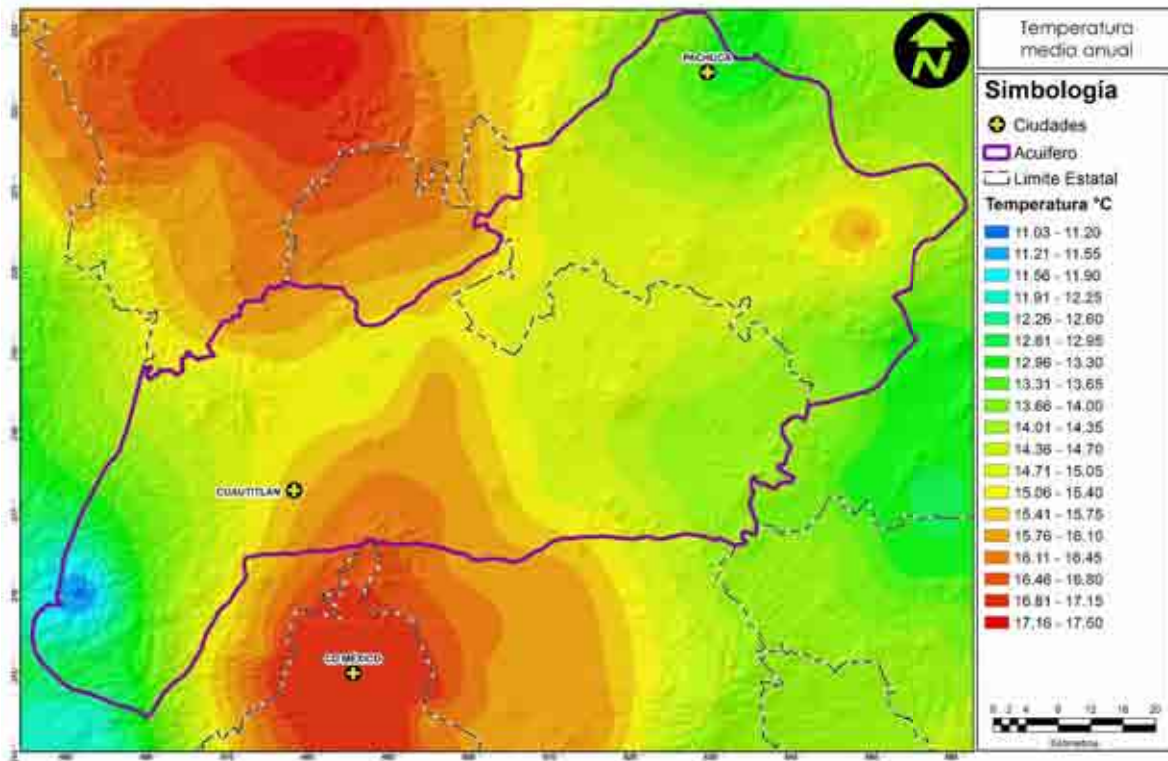


Figura 3. Isothermas medias anuales.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

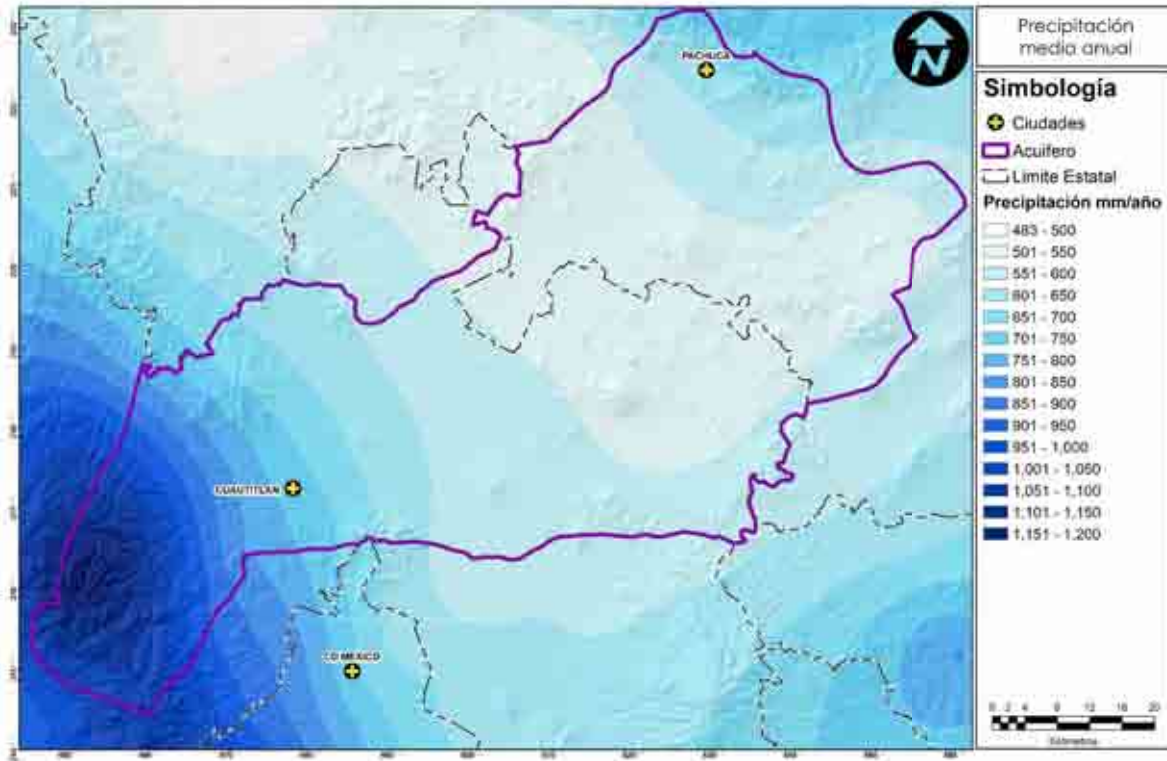


Figura 4. Isoyetas medias anuales.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

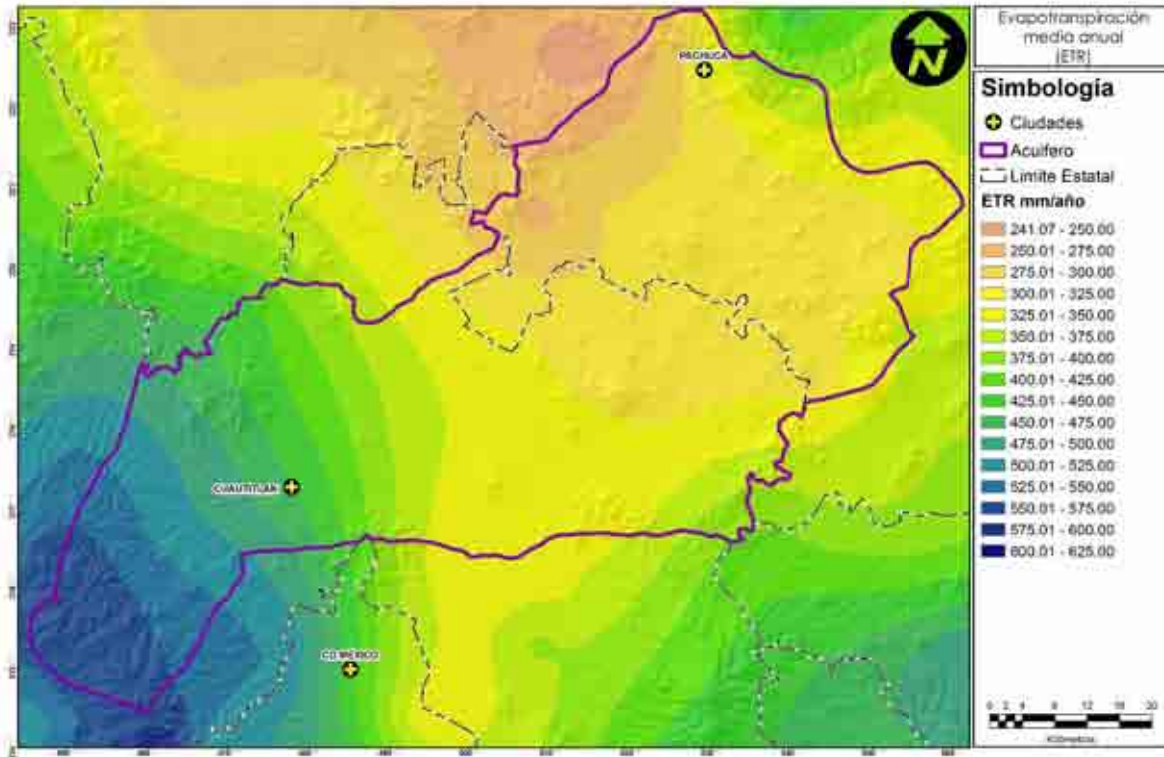


Figura 5. Evapotranspiración media anual.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hidrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

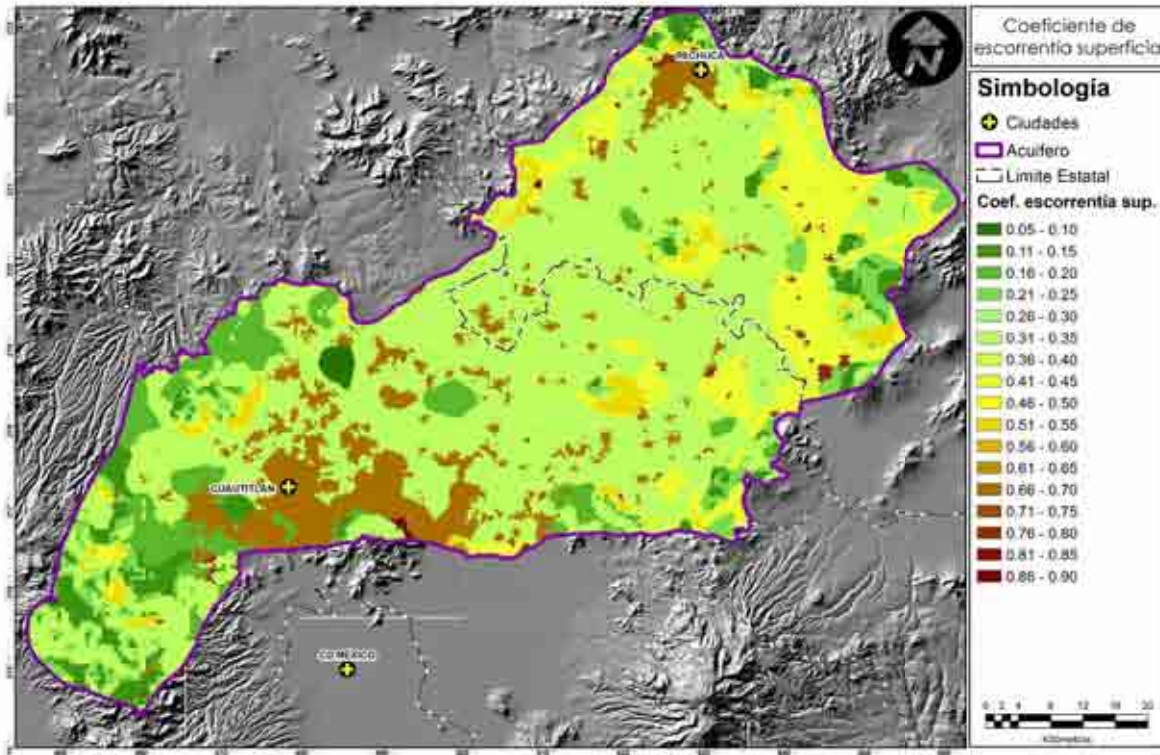


Figura 6. Coeficiente de escorrentía superficial (k).
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

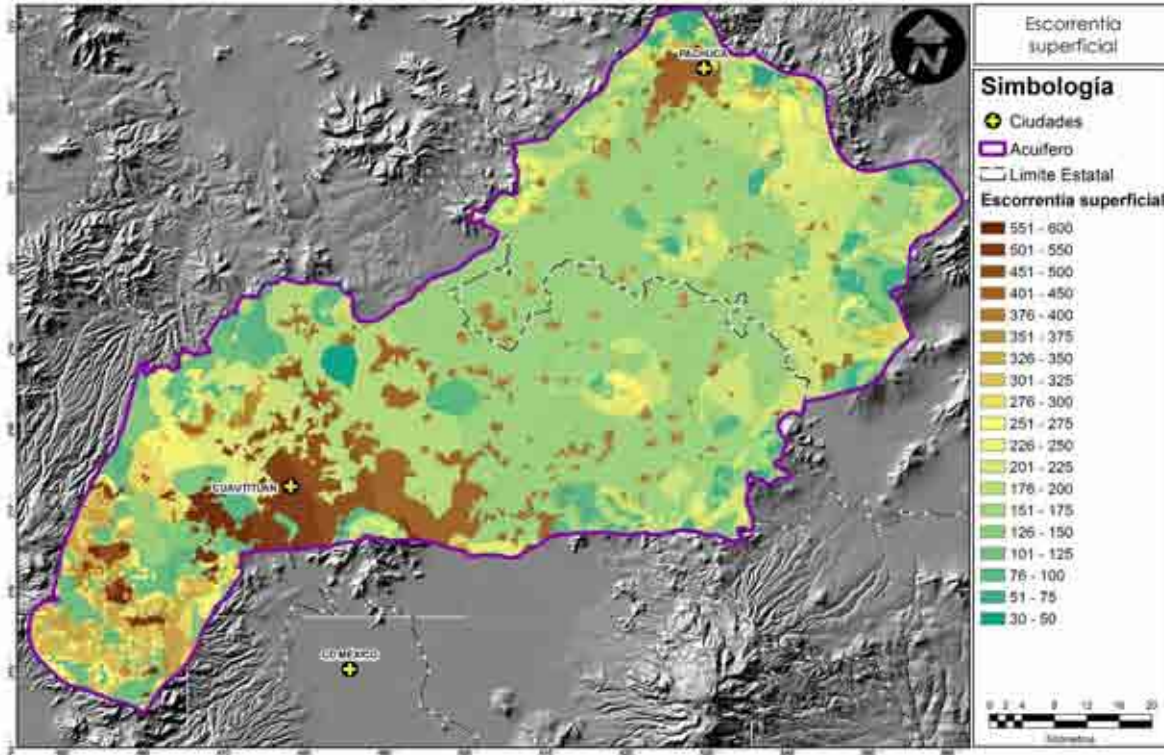


Figura 7. Escorrentía superficial.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hidrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

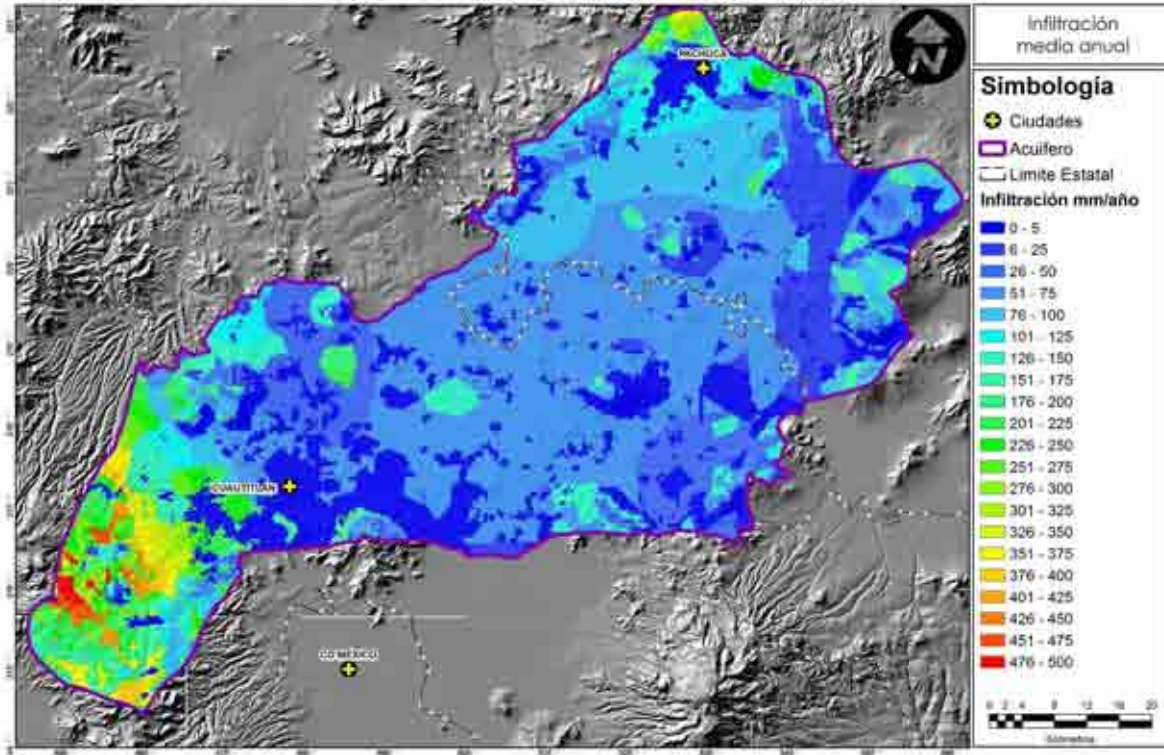


Figura 8. Infiltración del área de estudio.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hidrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

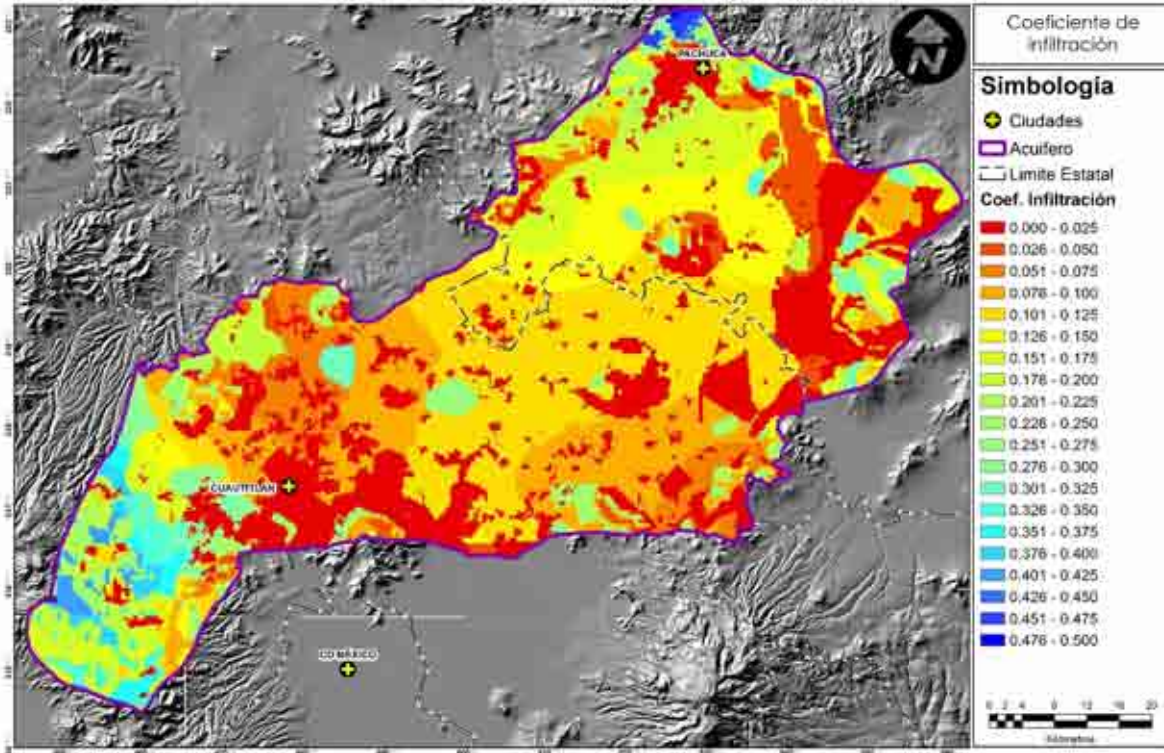


Figura 9. Coeficiente de infiltración.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

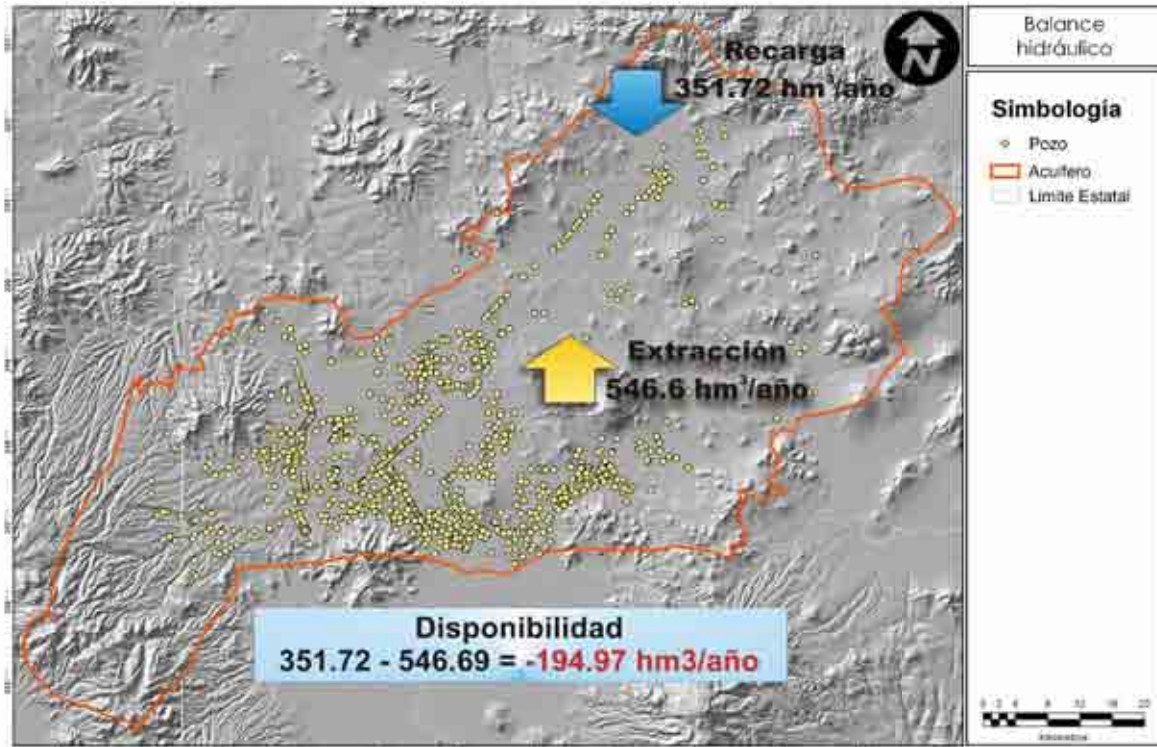


Figura 10. Balance hídrico del área de estudio.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hídrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

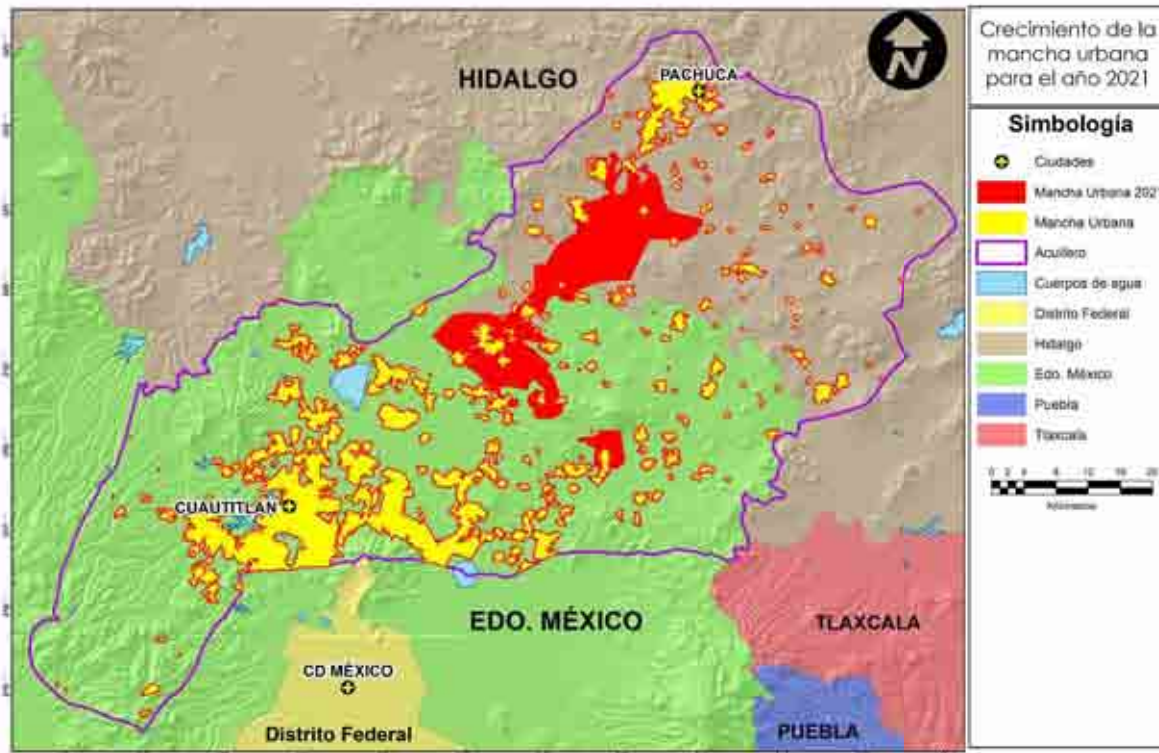


Figura 11. Crecimiento esperado de la mancha urbana para el año 2021.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hidrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

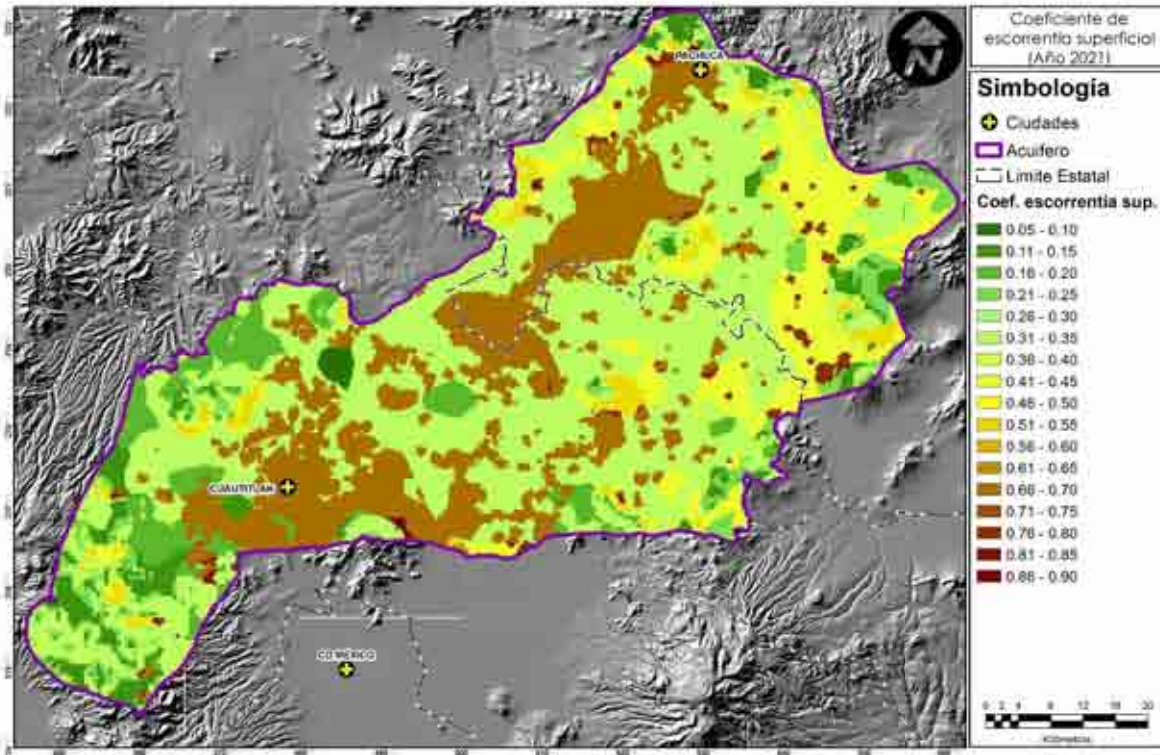


Figura 12. Coeficiente de escorrentía superficial para el año 2021.
Fuente. Elaboración propia.

Galindo Castillo E., Otazo Sánchez E. Ma., Reyes Gutiérrez L. R., Arellano Islas S. M., Gordillo Martínez A., González Ramírez C. A. (2010): "Balance hidrico y afectaciones a la recarga para el año 2021 en el acuífero Cuautitlan Pachuca.", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157

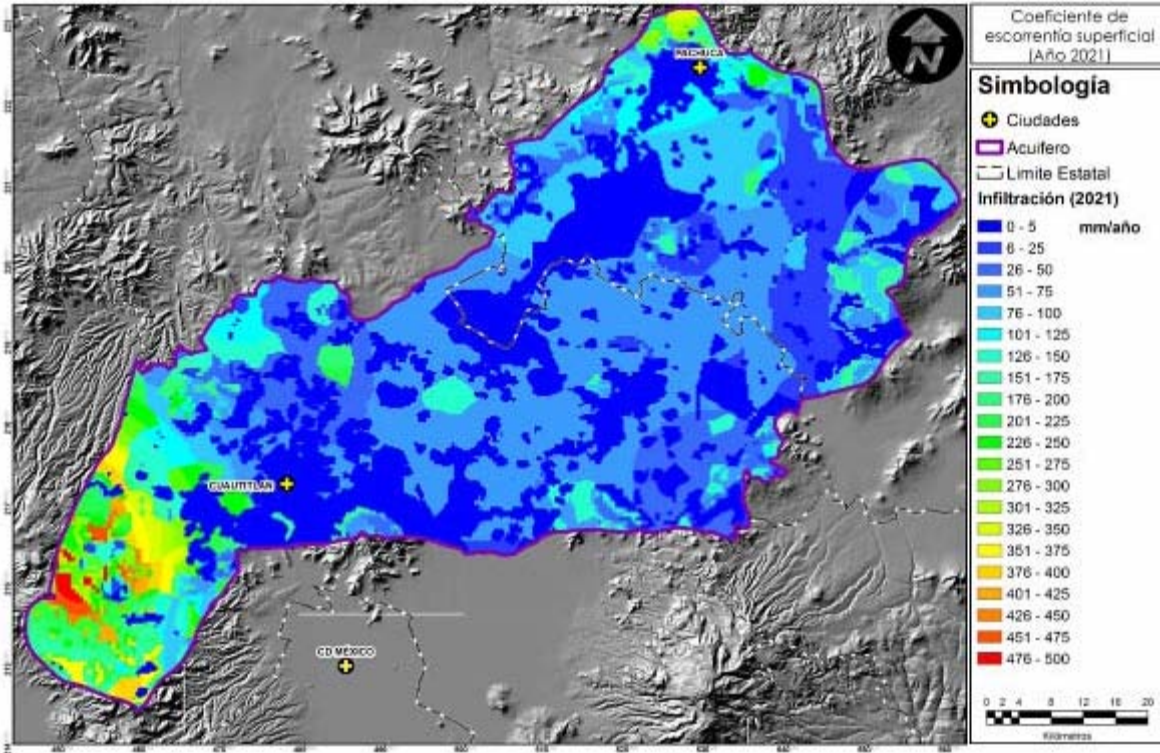


Figura 13. Infiltración del área de estudio para el año 2021.
Fuente. Elaboración propia.