



Universidad Autónoma del Estado de México



Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua

**Estimación espacio-temporal de la recarga de agua
subterránea mediante métodos de balance hídrico.**

Acuífero Texcoco, Estado de México.

TESIS

**Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias del Agua**

PRESENTA

HECTOR URIEL ZARAGOZA CONTRERAS

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO

CODIRECTORES DE TESIS

DRA. MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH

DR. JORGE PAREDES TAVARES

TOLUCA DE LERDO

DICIEMBRE, 2021

Resumen

En la Cuenca de México, el incremento de la población y la escasa disponibilidad de fuentes superficiales para abastecer la demanda de agua trae como consecuencia el incremento en las captaciones de agua subterránea, así como del volumen de extracción, esto ha generado que los acuíferos de la región, específicamente el acuífero Texcoco, se reporte en condición de sobreexplotación, esto en función de la relación extracción/recarga. De modo que, estimar la recarga es un elemento clave en el desarrollo de planes enfocados en el manejo sustentable de los recursos hídricos.

La construcción de un modelo conceptual de recarga resulta indispensable en cualquier estudio de carácter hidrogeológico, ya que permite la identificación de los procesos que determinan la recarga, así como la selección de los métodos de estimación. A través de la aplicación de los métodos de balance hídrico (balance hídrico del acuífero para estimar la recarga total y balance hídrico del suelo para recarga potencial) y con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se obtuvieron estimaciones confiables de la recarga.

Mediante la aplicación del método de balance hídrico del acuífero establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015 se estimó una recarga total de $118.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el periodo 2006 - 2018. Y por su parte para el balance hídrico del suelo se obtuvo una infiltración total de $115.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, lo cual fue considerado como recarga potencial para el periodo 1980 – 2018.

Los resultados obtenidos por los métodos de balance hídrico no se pueden comparar debido a que no comparten el mismo principio físico, por su parte el balance del suelo muestra una distribución espacial de la recarga potencial desde el punto de vista cualitativo y establece que las entradas provienen completamente de la precipitación, frente al balance del acuífero que si considera los parámetros hidrodinámicos lo que representa una ventaja desde el punto de vista cuantitativo, sin embargo para obtener estimaciones contundentes de la recarga es necesario realizarse nuevas investigaciones encaminadas a la obtención de dichos parámetros.

Abstract

In the Mexico Basin, the increase in population and the scarce availability of surface sources to supply the water demand has resulted in an increase in water catchment and extraction volume, which has caused the region's aquifers, specifically the Texcoco aquifer, to be reported as overdevelopment, based on the extraction/recharge ratio. Therefore, estimating recharge is a key element in the development of plans focused on the sustainable management of water resources.

The construction of a conceptual recharge model is indispensable in any hydrogeological study, since it allows the identification of the processes that determine recharge, as well as the selection of estimation methods. Through the application of water balance methods (aquifer water balance to estimate total recharge and soil water balance for potential recharge) and with the support of Geographic Information Systems (GIS), reliable recharge estimates were obtained.

Through the application of the aquifer water balance method established in NOM-011-CONAGUA-2015, a total recharge of 118.5 hm³/year was estimated for the period 2006 - 2018. For the soil water balance, a total infiltration of 115.5 hm³/year was obtained, which was considered as potential recharge for the period 1980 - 2018.

The results obtained by the water balance methods cannot be compared because they do not share the same physical principle, while the soil balance shows a spatial distribution of the potential recharge from the qualitative point of view and establishes that the inputs come entirely from precipitation, compared to the aquifer balance that does consider the hydrodynamic parameters, which represents an advantage from the quantitative point of view, however, to obtain conclusive estimates of recharge it is necessary to carry out new research aimed at obtaining these parameters.

Índice General

Capítulo 1. Introducción	1
Justificación contextual y científica.....	3
Hipótesis	4
Objetivos.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
Capítulo 2. Características del área de estudio	5
2.1. Localización y características generales	5
2.2 Clima.....	10
2.2.1. Precipitación	12
2.2.2. Temperatura	12
2.3. Geología.....	15
2.3.1. Estratigrafía.....	16
2.4. Hidrología superficial	25
2.5. Hidrología subterránea.....	27
2.5.1. Parámetros hidráulicos.....	28
2.5.2. Elevación del nivel estático	28
2.6. Población y desarrollo socioeconómico	30
2.7. Análisis de los estudios previos en el acuífero Texcoco	32
Capítulo 3. Marco Teórico.....	40
3.1. Recarga de agua subterránea.....	40
3.2. Métodos para estimar la recarga de agua subterránea	41
3.3. Modelo conceptual de recarga	46
3.3.1. Variabilidad espacial y temporal de la recarga.....	46
3.3.2. Clima.....	48

3.3.3. Suelo y geología.....	48
3.3.4. Topografía.....	48
3.3.5. Hidrología	49
3.3.6. Vegetación y uso del suelo	49
3.4. Los SIG como una herramienta en la estimación de la recarga.....	50
3.5. Modelo operacional de Balance Energético Superficial Simplificado (SSEBop) para la estimación de la evapotranspiración real.	52
Capítulo 4. Materiales y métodos	54
4.1. Búsqueda y recopilación de la información disponible	55
4.2. Conformación y procesamiento de la información.....	56
4.3. Elaboración del modelo conceptual de recarga del acuífero	60
4.3.1. Definición del área de balance.....	60
4.3.2. Definición de la temporalidad del balance hídrico	61
4.3.3. Identificación de las unidades hidroestratigráficas	62
4.3.4. Definición del régimen de flujo de agua subterránea	62
4.3.5. Identificación de las descargas del acuífero	64
4.4. Estimación de la recarga total por el método del balance hídrico del acuífero	65
4.4.1. Cálculo de la recarga inducida del acuífero.....	66
4.4.2. Cálculo de las entradas y salidas del acuífero por flujo subterráneo	66
4.4.3. Cálculo del cambio de almacenamiento del acuífero	68
4.4.4. Recarga vertical	69
4.4.5. Recarga total del acuífero	69
4.5. Estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo	70
4.5.1. Precipitación	70
4.5.2. Evapotranspiración real	71

4.5.4. Escurrimiento superficial.....	73
4.5.5. Infiltración	82
Capítulo 5. Análisis de resultados.....	83
5.1. Búsqueda y recopilación de la información.....	84
5.2. Conformación y procesamiento de la información.....	84
5.3. Elaboración del modelo conceptual de recarga del acuífero	84
5.3.1 Definición del área de balance.....	85
5.3.2. Definición de la temporalidad del balance hídrico	87
5.3.3. Identificación de las unidades hidroestratigráficas	90
5.3.4. Definición del régimen de flujo de agua subterránea	91
5.3.5. Identificación de las descargas del acuífero	97
5.4. Estimación de la recarga total por el método del balance hídrico del acuífero	105
5.4.1. Cálculo de la recarga inducida del acuífero.....	105
5.4.2. Cálculo de las entradas y salidas del acuífero por flujo subterráneo	105
5.4.3. Cálculo del cambio de almacenamiento del acuífero	108
5.4.4. Cálculo de la recarga vertical del acuífero.....	114
5.4.5. Recarga total del acuífero	114
5.5. Estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo	114
5.5.1. Precipitación	114
5.5.2. Evapotranspiración real	117
5.5.3. Escurrimiento superficial.....	120
5.5.5. Infiltración	129
5.6. Discusión de los resultados obtenidos con base en investigaciones previas	137
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	140
6.1. Conclusiones.....	141

6.2. Recomendaciones	142
Bibliografía	145

Índice de Figuras

Figura 2.1.	Localización del acuífero Texcoco en la Cuenca de México	6
Figura 2.2.	Ubicación del acuífero Texcoco, Estado de México.....	7
Figura 2.3.	Mapa hipsométrico del área de estudio.....	9
Figura 2.4.	Climas en el acuífero Texcoco, Estado de México	11
Figura 2.5.	Precipitación media anual en el acuífero Texcoco, Estado de México.....	13
Figura 2.6.	Temperatura media anual en el acuífero Texcoco, Estado de México....	14
Figura 2.7.	Geología superficial del área de estudio.....	22
Figura 2.8.	Sección geológica A – A'.	23
Figura 2.9.	Sección geológica B – B'.....	24
Figura 2.10.	Hidrología superficial del área de estudio.....	26
Figura 2.11.	Elevación del nivel estático correspondiente al año 2011 en el área de estudio.....	29
Figura 2.12.	Evolución de la población en el acuífero Texcoco.....	31
Figura 3.1.	Esquema del proceso para desarrollar un modelo conceptual de recarga.....	47
Figura 4.1.	Esquema metodológico para el desarrollo de esta investigación.....	55
Figura 4.2.	Ejemplo del trazado de isolíneas por el método de triangulación.....	64
Figura 4.3.	Ejemplo de celda de entrada por flujo subterráneo y sus parámetros en la ecuación.....	68
Figura 4.4.	Esquema geomático del cálculo de la precipitación media mensual....	71
Figura 4.5.	Esquema geomático del cálculo de la precipitación media anual del área de estudio.....	71
Figura 4.6.	Esquema geomático del cálculo de la ETA media mensual.....	72
Figura 4.7.	Esquema geomático del cálculo de la ETA media anual.....	72
Figura 4.8.	Distribución de los diferentes tipos de suelos en el área de estudio.....	76
Figura 4.9.	Cobertura del suelo en el área de estudio.....	78
Figura 4.10.	Modelo digital de elevaciones (MDE) del área de estudio.....	80
Figura 4.11.	Esquema geomático del establecimiento del Ce del área de estudio.....	81

Índice de Figuras

Figura 4.12.	Esquema geomático del cálculo del escurrimiento superficial.....	82
Figura 4.13.	Esquema geomático del cálculo de la infiltración en el área de estudio.....	82
Figura 5.1.	Área de balance delimitada para el acuífero Texcoco.....	86
Figura 5.2.	Comportamiento histórico del nivel piezométrico en el acuífero Texcoco.....	88
Figura 5.3.	Comportamiento histórico de la precipitación media anual en el acuífero Texcoco.....	89
Figura 5.4.	Mapa de unidades hidroestratigráficas del acuífero Texcoco y de elevación del nivel piezométrico del año 2018.....	95
Figura 5.5.	Sección hidrogeológica A – A' del acuífero Texcoco.....	96
Figura 5.6.	Distribución de los pozos registrados en el censo del año 2006.....	98
Figura 5.7.	Distribución de los pozos de extracción inscritos ante el REPDA 2019.....	100
Figura 5.8.	Modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco.....	104
Figura 5.9.	Celdas de entrada y salida por flujos horizontales en el acuífero Texcoco, 2018.....	106
Figura 5.10.	Evolución del nivel piezométrico en el acuífero Texcoco en el periodo 2006 – 2018.....	110
Figura 5.11.	Polígonos de evolución piezométrica para el periodo 2006 – 2018....	111
Figura 5.12.	Precipitación media anual en el acuífero Texcoco para el periodo 1980 – 2018.....	116
Figura 5.13.	Comportamiento de la precipitación a escala mensual en el acuífero Texcoco (elaborado con datos de Daymet, 2021).....	117
Figura 5.14.	Evapotranspiración real (ETA) en el acuífero Texcoco para el periodo 2003 – 2018.....	119

Índice de Figuras

Figura 5.15.	Comportamiento a escala mensual de la evapotranspiración real (ET _A), precipitación y temperatura media anual en el acuífero Texcoco.....	120
Figura 5.16.	Clasificación del suelo de acuerdo con base en su permeabilidad en el acuífero Texcoco.....	121
Figura 5.17.	Cobertura del suelo en el acuífero Texcoco en el año 2016 clasificada en función de Benítez et al., 1980.....	123
Figura 5.18.	Pendiente del terreno en el área de estudio clasificada en función de Benítez et al., 1980.....	124
Figura 5.19.	Valores del coeficiente de escurrimiento (Ce) del área de estudio en función de Benítez., et al., 1980.....	126
Figura 5.20.	Escurrimiento superficial en el área de estudio.....	127
Figura 5.21.	Comportamiento a escala mensual del escurrimiento superficial y la precipitación media anual en el acuífero Texcoco.....	128
Figura 5.22.	Infiltración total (recarga potencial) en el acuífero Texcoco, Estado de México.....	130
Figura 5.23.	Comportamiento de las variables de la ecuación de balance hídrico del suelo en el acuífero Texcoco.....	131
Figura 5.24.	Evaluación de la recarga potencial considerando las unidades hidroestratigráficas.....	133
Figura 5.25.	Modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco con los resultados de la estimación de la recarga.....	135

Índice de Tablas

Tabla 2.1.	Secuencia estratigráfica del acuífero Texcoco.....	21
Tabla 2.2.	Número de habitantes en los municipios comprendidos dentro de los límites administrativos del acuífero Texcoco, Estado de México.....	31
Tabla 2.3.	Estimaciones previas de la recarga realizadas en el área de estudio.....	39
Tabla 3.1.	Coefficientes de correlación del modelo SSEBop para las diferentes coberturas del suelo.....	53
Tabla 4.1.	Insumos considerados en la presente investigación.....	57
Tabla 4.2.	Valores de transmisividad para las unidades hidroestratigráficas.....	67
Tabla 4.3.	Clasificación de la permeabilidad del suelo establecida por Benítez.....	73
Tabla 4.4.	Valores del coeficiente de escorrentía, según Benítez.....	74
Tabla 4.5.	Suelos presentes en el área de estudio y su clasificación.....	75
Tabla 4.6.	Asignación de nuevos valores al grado de permeabilidad.....	77
Tabla 4.7.	Cobertura de suelo y su nueva clasificación de acuerdo con los criterios de Benítez et al. 1980.....	79
Tabla 4.8.	Asignación de nuevos valores a la cobertura del suelo.....	79
Tabla 4.9.	Asignación de nuevos valores a la pendiente.....	81
Tabla 5.1.	Pozos de observación localizados en el acuífero Texcoco para la definición del régimen de flujo del año 2018.....	93
Tabla 5.2.	Volumen de extracción obtenido en el censo de aprovechamientos del año 2006.....	99
Tabla 5.3.	Volumen de extracción de usuarios registrados ante el REPDA, 2019...	101
Tabla 5.4.	Volumen de extracción para obtener la recarga inducida del acuífero....	105
Tabla 5.5.	Cálculo de entradas y salidas por flujo horizontal en el acuífero Texcoco 2018.....	107
Tabla 5.6.	Evolución piezométrica de los pozos de observación para el periodo 2006 —2018.....	108
Tabla 5.7.	Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo 2006 – 2018....	112

Índice de Tablas

Tabla 5.8.	Precipitación media anual en el acuífero Texcoco.....	115
Tabla 5.9.	Evapotranspiración real ET_A en el acuífero Texcoco.....	118
Tabla 5.10.	Escorrimento superficial en el acuífero Texcoco.....	128
Tabla 5.11.	Balance hídrico del suelo en el acuífero Texcoco.....	131

Acrónimos

CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
IFOMEGEM	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
OCAVM	Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México
UACH	Universidad Autónoma Chapingo
UNAM	Universidad Autónoma de México
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la cultura

Siglas y abreviaturas

AT	Acuífero Texcoco
DEM	Digital Elevation Model
DOF	Diario oficial de la Federación
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
SIG	Sistema de Información Geográfica

Capítulo 1

Introducción

Las aguas subterráneas son una parte fundamental del ciclo hidrológico y del medio ambiente, su papel es crucial en el sostenimiento de ecosistemas y para el desarrollo de diferentes actividades humanas, ya que proporcionan casi el 50% del agua potable (UNESCO y IWSSM, 2021). De acuerdo con las estimaciones de la UNESCO (2019), por lo menos la mitad de la población mundial (alrededor de 3 500 millones de habitantes) depende de las aguas subterráneas, distribuyéndose en los siguientes sectores: a) uso doméstico 22%, b) irrigación y ganadería 67% y c) industria y minería 11% (Hatch, 2018).

Capítulo 1.

A pesar de estas dimensiones estimadas, las aguas subterráneas suelen estar infravaloradas porque son invisibles a simple vista. Su valor se esconde bajo el suelo y a menudo, la población en general y los responsables políticos no son plenamente conscientes de la importancia de este valioso recurso y no recibe la atención que requiere (UNESCO y IWSSM, 2021).

Actualmente, las aguas subterráneas están sometidas a una demanda creciente en todo el mundo, como consecuencia del acelerado crecimiento de la población, cambios en los patrones de consumo, el aumento de la demanda de agua y el cambio climático. La demanda mundial se espera que continúe incrementando a un ritmo parecido hasta el año 2050 (UNESCO, 2019).

La combinación de los factores mencionados, son los principales detonadores de la sobreexplotación de acuíferos y afecta a importantes regiones del mundo. La *sobreexplotación* se manifiesta como una *baja* en el potencial de extracción, así como modificaciones en la calidad del agua subterránea, creando una situación no sustentable. De acuerdo con lo anterior, alcanzar la sustentabilidad en la extracción de las aguas subterráneas es vital para asegurar el suministro de agua a generaciones futuras (Gorelick y Zheng, 2015). Aunque las aguas subterráneas son un recurso renovable, su recarga requiere mucho tiempo (UNESCO, 2021).

En México, de acuerdo con el Sistema Nacional de Información de Agua (SINA) (CONAGUA, 2020), de los 653 acuíferos para la administración del agua subterránea se tienen 157 acuíferos en condición de sobreexplotación, esto es en función de la relación extracción/recarga. La sobreexplotación de acuíferos es el resultado de diferentes problemáticas entorno a la gestión de los recursos hídricos subterráneos, lo cual requiere en primer lugar, actualizar el conocimiento hidrogeológico de los sistemas de las aguas subterráneas, que es fundamental para el uso sostenible de este recurso (Vélez et al., 2020).

Bajo esta condición es necesario estimar la recarga que recibe un acuífero en un determinado tiempo, a la luz de la información disponible mediante métodos de balance hídrico y considerando como herramienta fundamental a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales pueden encaminar a obtener resultados con mayor precisión en relación con el volumen de recarga de agua subterránea.

Justificación contextual y científica

El acuífero Texcoco (AT), pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México, la región más poblada del país y, al mismo tiempo, con menor extensión territorial (CONAGUA, 2018). El desarrollo histórico y económico de la Cuenca de México ha ejercido un papel trascendental en el acuífero objeto de estudio, ha ocasionado una demanda significativa en las últimas tres décadas, un incremento en las captaciones de agua subterránea, así como en los volúmenes de extracción (DOF, 2019).

Con base en el resultado del cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea, el acuífero Texcoco presenta un déficit de $-111.02 \text{ hm}^3/\text{año}$ (CONAGUA, 2020), es decir que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones y debido a la creciente demanda de agua subterránea y la insuficiente disponibilidad de agua en la zona, se está extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero (DOF, 2019).

En consecuencia, se han derivado efectos negativos en el acuífero, tales como: el abatimiento de los niveles del agua subterránea, alteraciones del flujo subterráneo, disminución del caudal y rendimiento en pozos, disminución e incluso desaparición de manantiales, además de hundimientos del terreno o aparición de grietas que en algunos casos destruyen el equipamiento urbano o causan daños en viviendas (DOF, 2019). Lo anteriormente mencionado influye en el deterioro de la calidad del agua y de continuar incrementándose la demanda y extracción, existe el riesgo de agravar aún más la sobreexplotación del acuífero.

En relación con la problemática expuesta y considerando la recarga del acuífero como un elemento clave dentro de la ecuación del cálculo de la disponibilidad del agua subterránea (NOM-011-CONAGUA-2015), en el presente trabajo se estimó la recarga de agua subterránea a través de métodos de balance hídrico, a la luz de la información reciente y con apoyo de los software de SIG, los cuales funcionan como una herramienta eficiente y novedosa en el procesamiento y generación de información, con el fin de obtener estimaciones más confiables de la recarga, además proporcionar pie al desarrollo de investigaciones orientadas al desarrollo y manejo de los recursos hídricos subterráneos.

Hipótesis

El empleo de métodos de balance hídrico (balance del acuífero y balance hídrico del suelo) en el acuífero Texcoco, Estado de México, con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica permitirá estimar la recarga potencial y total con menor incertidumbre en los resultados.

Objetivos

Objetivo general

Estimar la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero de Texcoco, Estado de México considerando las variaciones espacio-temporales, para disminuir la incertidumbre en los resultados y consecuentemente facilitar el manejo sustentable del acuífero.

Objetivos específicos

1. Recopilar, analizar y geoprocesar la información disponible sobre el acuífero para conformar la base de geodatos y el modelo conceptual de recarga del acuífero.
2. Estimar la recarga potencial mediante el método de balance hídrico del suelo para inferir el volumen anual de agua de la precipitación que pudiese alcanzar el acuífero.
3. Estimar la recarga total mediante el método de balance hídrico del acuífero, para conocer el volumen total anual de agua de cualquier origen que recibe el acuífero.
4. Analizar los resultados de las dos variantes del método de balance hídrico (balance hídrico del suelo y balance hídrico del acuífero) en la estimación de la recarga del acuífero Texcoco, Estado de México para complementar los resultados obtenidos, lo que permitirá reducir las incertidumbres de las estimaciones realizadas.

Capítulo 2

Características del área de estudio

2.1. Localización y características generales

El acuífero Texcoco (AT), se localiza en el centro del país, en la porción oriente del Estado de México y la zona central de la Cuenca de México (figura 2.1). Ha sido catalogado por la CONAGUA con el número 1507 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS). Limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al sur con el acuífero Chalco-Amecameca (ambos acuíferos pertenecen al Estado de México), al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México y al este con el acuífero Soltepec el cual pertenece al estado de Tlaxcala (CONAGUA, 2014).

Capítulo 2. Características del área de estudio

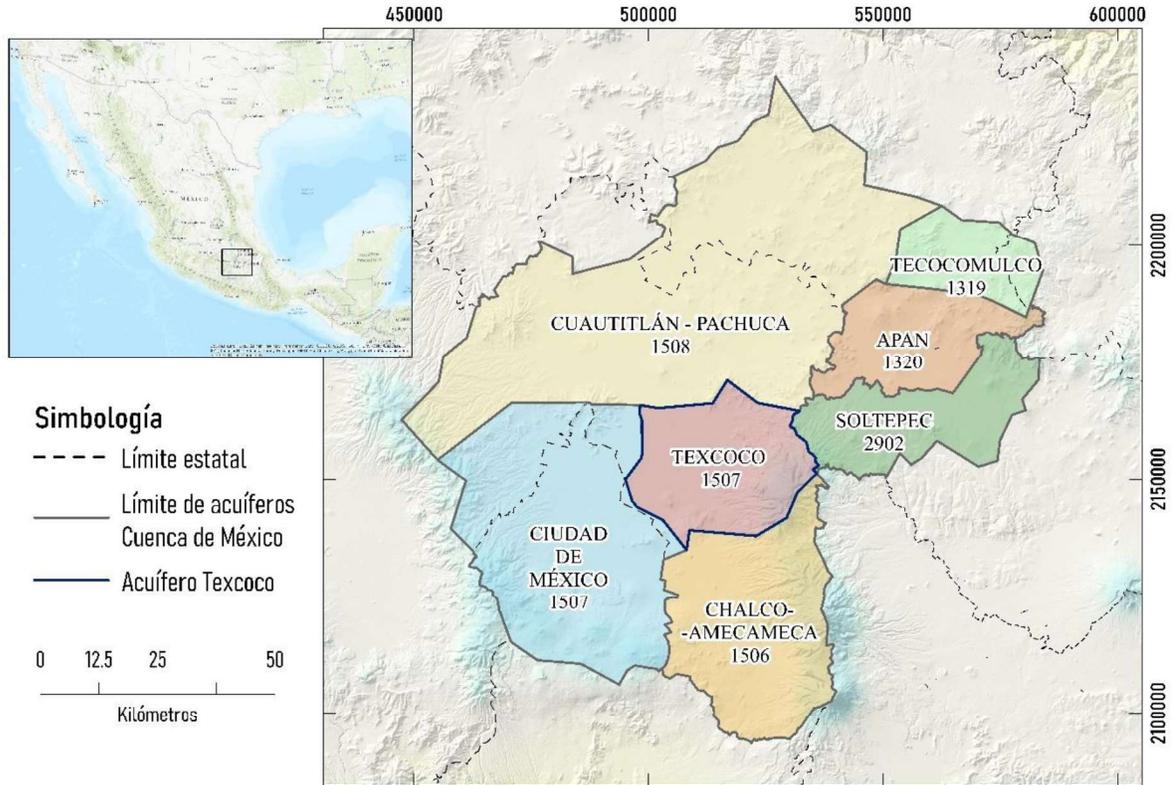


Figura 2.1. Localización del acuífero Texcoco en la Cuenca de México (CONAGUA, 2020).

Este acuífero tiene un área de 933.61 km² (CONAGUA, 2020), dentro de su límite se localizan 14 municipios del Estado de México (figura 2.2), de los cuales comprende *totalmente* a: Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac y Papalotla; *parcialmente* a: Texcoco, Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc y así como *pequeñas porciones* de: Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca (CONAGUA 2014).

El AT se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, caracterizada por cadenas montañosas de origen volcánico, extensas coladas lávicas, conos dispersos, amplios volcanes escudo y una serie de estratovolcanes que atraviesan al país en casi línea recta, integrada por los volcanes: Volcán de Colima, Xinantecátl (Nevado de Toluca), Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Matlacuétl (La Malinche), y Citlaltépetl (Pico de Orizaba) (CONAGUA, 2014).

Capítulo 2. Características del área de estudio

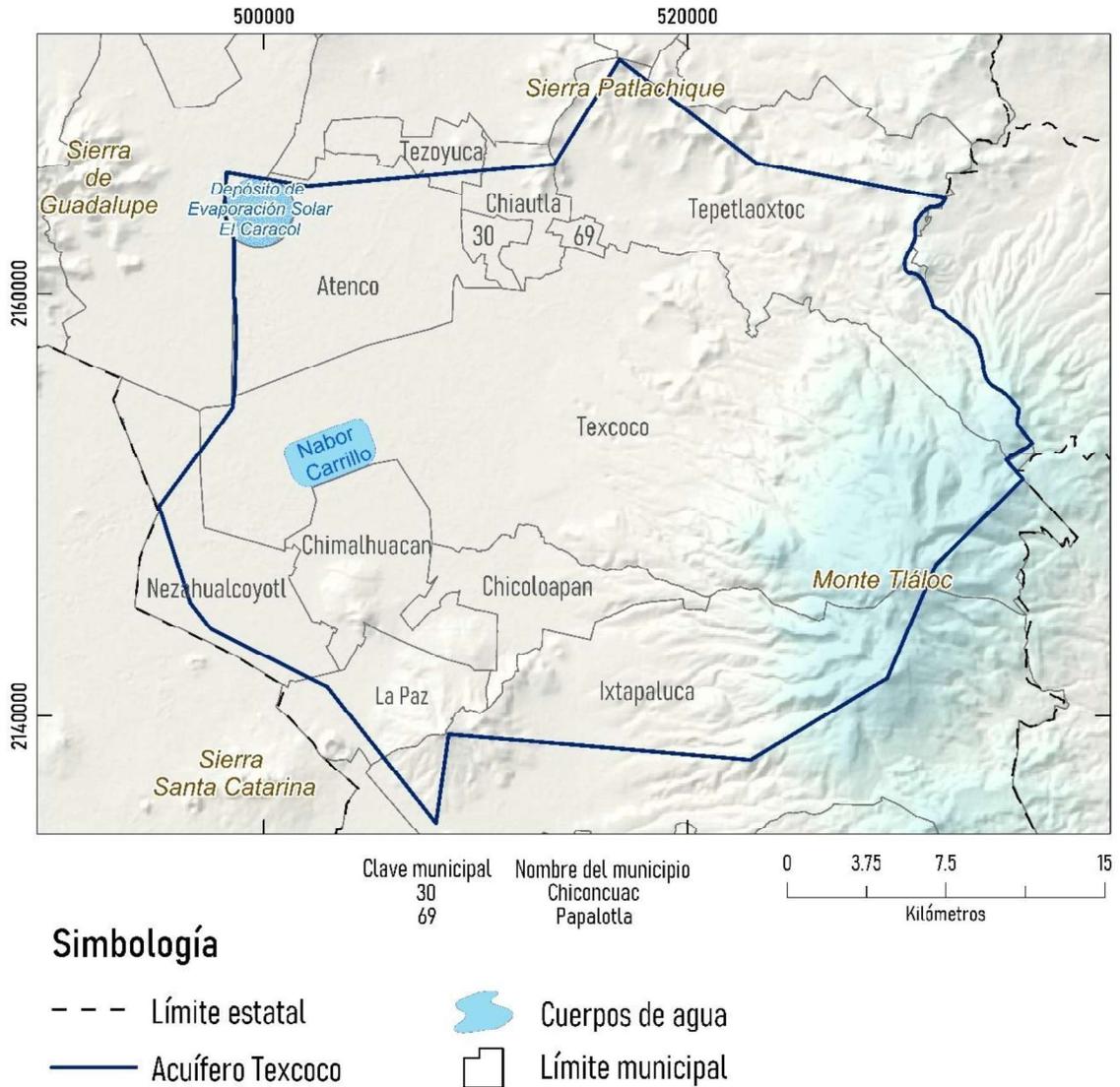


Figura 2.2. Ubicación del acuífero Texcoco, Estado de México (CONAGUA, 2020).

Capítulo 2. Características del área de estudio

Entre las montañas que circundan a la Cuenca de México destaca la Sierra Nevada que se encuentra al este, mientras que la Sierra de las Cruces se localiza al oeste. Al sur se encuentra la Sierra Chichinautzin (cadena montañosa más reciente), que durante su erupción bloqueó el drenaje hacia el sur y cerrando definitivamente la cuenca (CONAGUA, 2011), convirtiéndola en una cuenca endorreica, favoreciendo la acumulación de agua en la región central, dando origen a la formación de los lagos: Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac, actualmente desecados o en proceso de desecación (CONAGUA, 2014).

La planicie del Ex Lago de Texcoco se encuentra a una elevación de 2 230 a 2 060 msnm, además de ser extensa se caracteriza por tener una capa arcillosa donde la acumulación de agua en los tiempos de máxima precipitación permite la formación de pequeños o grandes lagos (Lugo y Salinas, 1996). De acuerdo con Mendoza (2012), esta planicie presenta pequeñas elevaciones aisladas como el cerro Peñón de los Baños, una estructura volcánica cuya elevación es de apenas unos 50 m sobre el nivel de la planicie y está afectado por numerosas fallas debido que es una estructura activa.

Al norte de la planicie se encuentra la Sierra de Guadalupe con una elevación máxima de 2 980 msnm, de acuerdo con Lugo y Salinas (1996), presenta laderas cortas y muy inclinadas con un modelado fluvial intenso, así como escarpes resultantes de la erosión gravitacional. Hacia el noreste se encuentra el Cerro Chiconautla y la Sierra de Patlachique con elevaciones entre 2 400 y 2 700 msnm.

En el este de la región se encuentra el Monte Tláloc, el rasgo topográfico más alto con una elevación de más de 4 000 msnm (figura 2.3). Finalmente, al sur se encuentra los cerros El Pino, Chimalhuachi, La Estrella y el volcán La Caldera con elevaciones entre 2 450 y 2 750 msnm, por su parte el cerro Chimalhuachi es una estructura cónica, con laderas cortas de pendiente suave, y debido a que el relieve es joven y está constituido por materiales bastante permeables que no muestran un patrón de drenaje fluvial predominante, ni rasgos de erosión (Lugo & Salinas, 1996).

Capítulo 2. Características del área de estudio

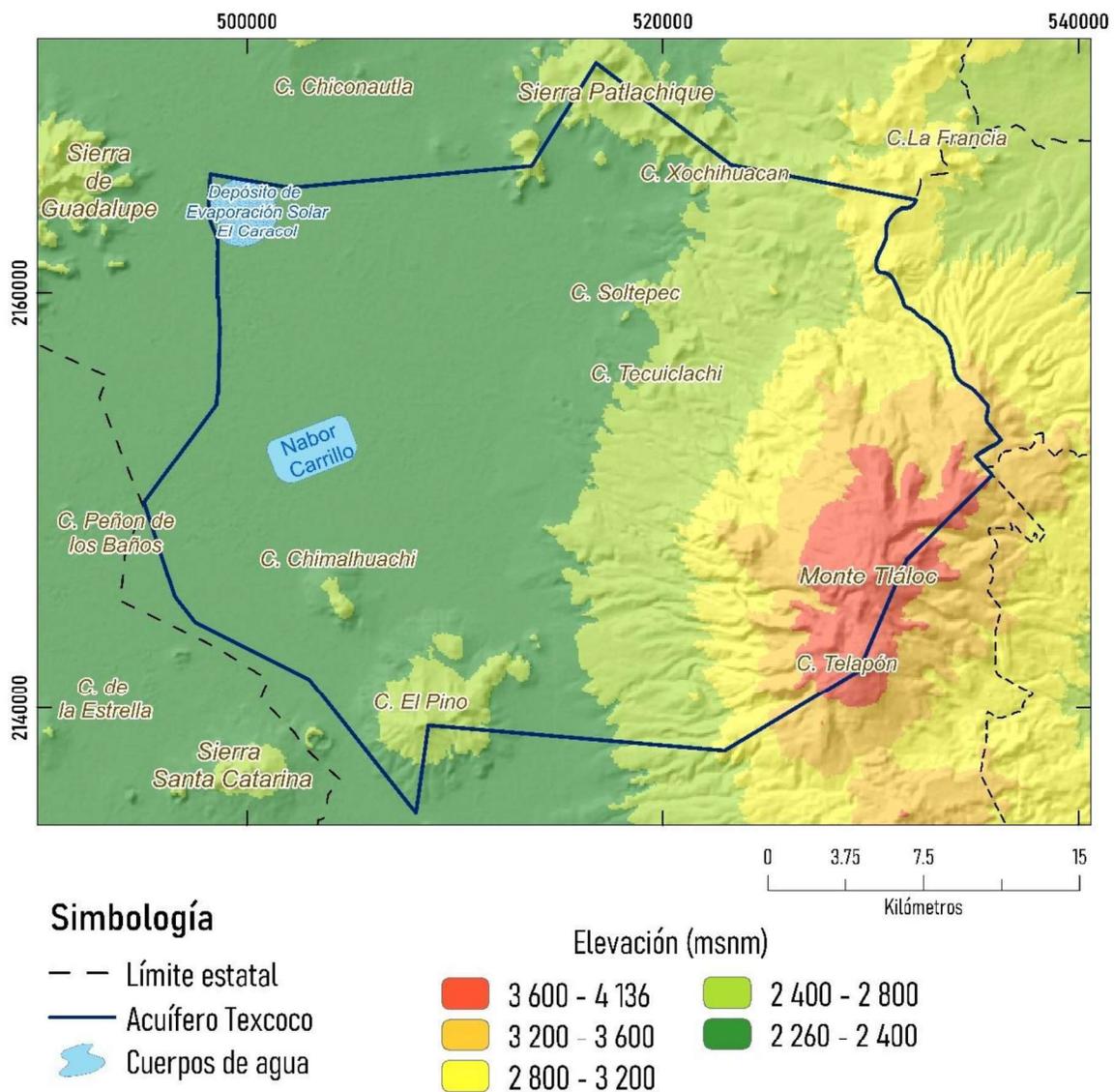


Figura 2.3. Mapa hipsométrico del área de estudio (IFOMEGEM, 2013).

Capítulo 2. Características del área de estudio

2.2 Clima

El clima en el área de estudio está determinado en dos estaciones bien definidas, el periodo seco, de noviembre a abril y la estación húmeda de mayo a octubre. Durante el periodo seco la circulación del aire provoca altas y densas cortinas de polvo en la planicie (DUMAC, 2005).

De acuerdo con la CONAGUA-UACH (2009), y con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana (García, 1981), en el área de estudio se presentan los siguientes tipos de climas (figura 2.4):

Cb'(w2): clima templado, subhúmedo con verano fresco largo, es el más húmedo de los templados subhúmedos con régimen de lluvias en verano y escaso porcentaje de lluvia invernal de poca oscilación térmica, la temperatura del mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano. La temperatura media anual entre 5°C y 12°C y la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm.

C(w0): clima templado subhúmedo con verano fresco, el más seco de los templados subhúmedos, con régimen de lluvias en verano, canícula, un importante porcentaje de lluvia invernal y poca oscilación térmica. La temperatura media anual se encuentra entre 12°C y 18°C y la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm.

C(w1): clima templado subhúmedo, con verano fresco e intermedio entre el C_{w0} y C_{w2}, régimen de lluvias en verano, escaso porcentaje de lluvia invernal y poca oscilación térmica. La temperatura media anual se encuentra entre 12°C y 18°C y la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm.

C(w2): clima templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C. La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm, y lluvias en verano.

BS1kw: clima semiseco estepario, el más húmedo de los semisecos, templado con verano cálido con régimen de lluvias en verano y escaso porcentaje de lluvia invernal, extremoso, la temperatura del mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano. La temperatura media anual se encuentra entre 12°C y 18°C.

Capítulo 2. Características del área de estudio

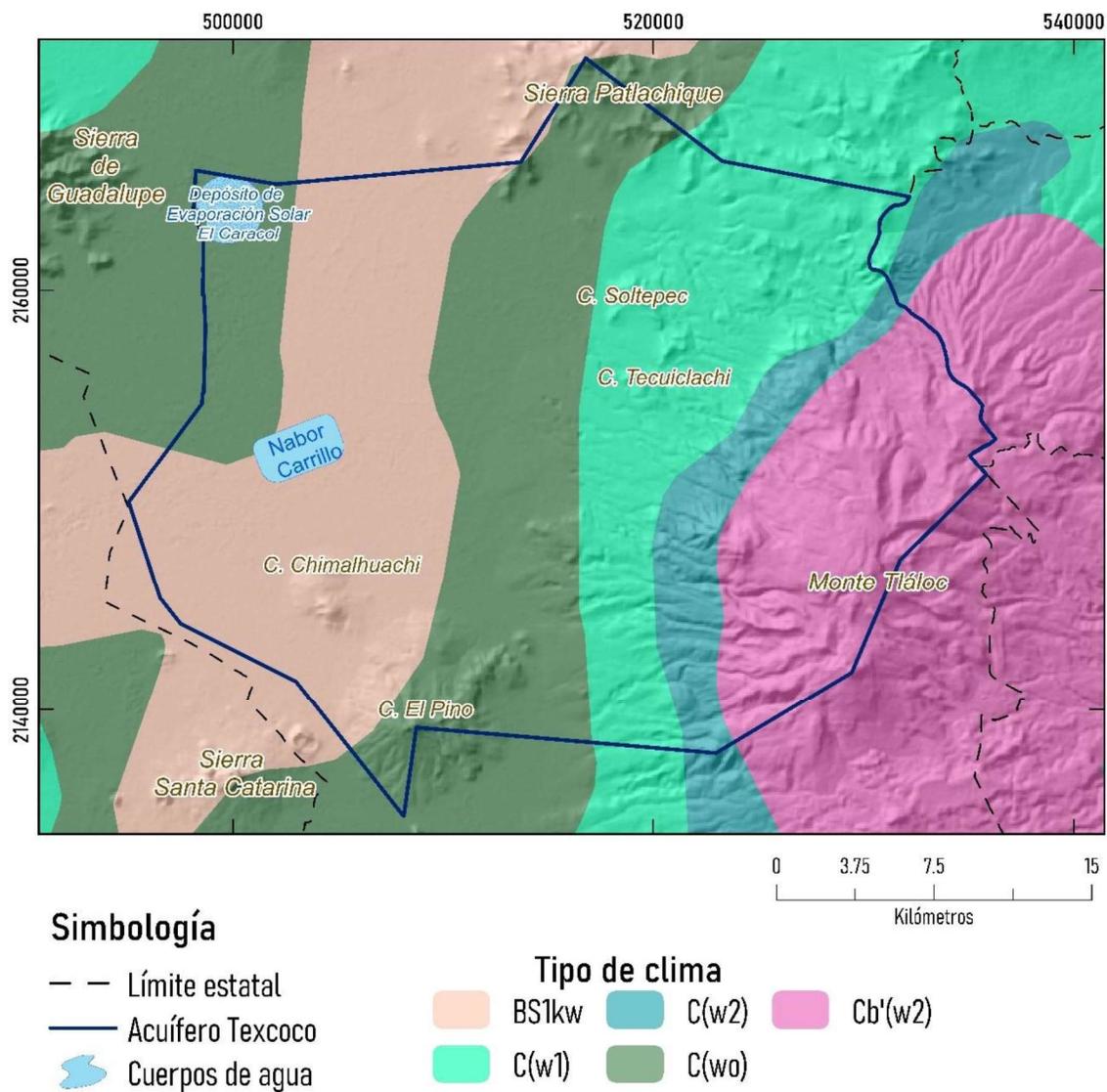


Figura 2.4. Climas en el acuífero Texcoco, Estado de México (CONAGUA-UACH, 2009).

Capítulo 2. Características del área de estudio

2.2.1. Precipitación

En el área de estudio la magnitud de la precipitación puede variar en el espacio y en el tiempo (CONAGUA-UACH, 2009). De acuerdo con la CONAGUA (2014), la temporada de lluvias corresponde a los meses de mayo a septiembre, presentándose los máximos valores de precipitación en los meses de julio y agosto, por otro lado, la temporada seca corresponde a los meses de noviembre a abril, en los cuales en algunas ocasiones no se reporta precipitación alguna.

La precipitación media anual en el área de estudio es de 500 mm en la porción oeste en el Ex Lago de Texcoco, en la zona central del acuífero la precipitación varía de 600 mm a 700 mm aumentando gradualmente hacia las zonas altas y hacia el suroeste es donde es superior a los 1 000 mm anuales en el Monte Tláloc (figura 2.5) (IFOMEGEM, 2013).

2.2.2. Temperatura

La temperatura media anual en el acuífero Texcoco oscila entre los 8°C y 16°C, las temperaturas más bajas se presentan en las zonas altas, es decir en el Monte Tláloc, en la porción este y presentan un aumento hacia los 16°C conforme se dirige hacia el centro del área de estudio, la temperatura desciende nuevamente a los 14°C hacia el oeste en la planicie del Ex Lago de Texcoco y al límite sur en la cima del cerro El Pino, en el municipio de Ixtapaluca (figura 2.6) (IFOMEGEM, 2013).

Capítulo 2. Características del área de estudio

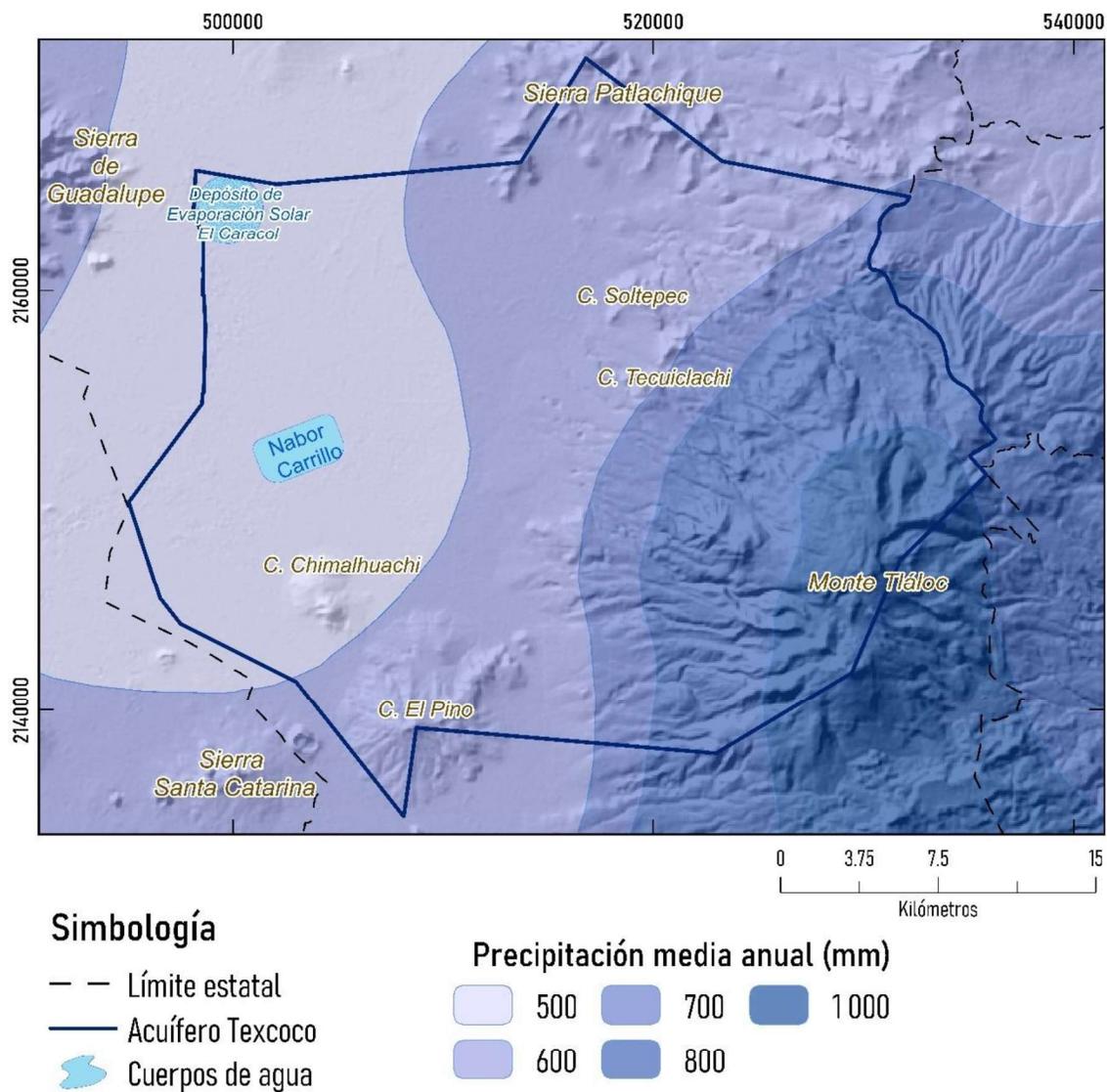


Figura 2.5. Precipitación media anual en el acuífero Texcoco, Estado de México (IFOMEGEM, 2013).

Capítulo 2. Características del área de estudio

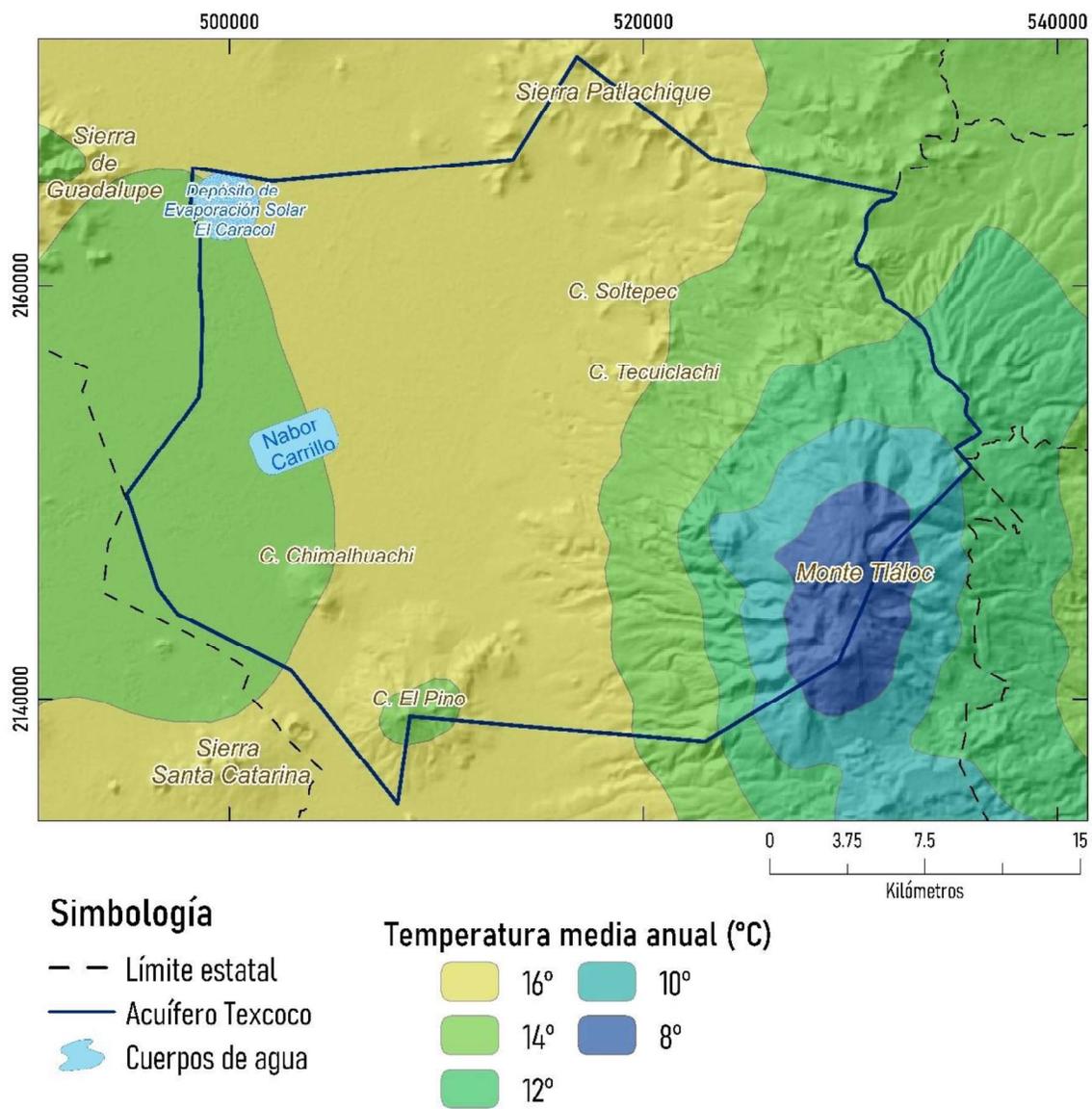


Figura 2.6. Temperatura media anual en el acuífero Texcoco, Estado de México (IFOMEGEM, 2013).

2.3. Geología

De acuerdo con la CONAGUA (2014), la geología del acuífero está íntimamente ligada al desarrollo y evolución de la Cuenca de México; las rocas que la constituyen deben su origen a procesos volcánicos y tectónicos desarrollados desde el Eoceno. Durante este período iniciaron un conjunto de procesos volcánicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lava, toba y brecha. Mientras que durante el Mioceno temprano predominaron las erupciones de andesita y dacita, con un espesor promedio de 600 a 700 m, esta actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un extenso fracturamiento con una orientación W-E. En la base de la Sierra de Guadalupe y en cerros como Coatepec y Gordo, existen afloramientos de toba, brecha y complejos volcánicos del Mioceno, profundamente erosionados, cuya composición varía de andesita a dacita. Hacia el final del Mioceno inicio la formación de las sierras mayores: Sierra de Río Frío y Sierra Nevada.

Los procesos estructurales desarrollados durante el Plioceno Tardío y Cuaternario dieron origen a la formación de amplias fosas tectónicas con un rumbo preferentemente NE definidas como: Tlálloc-Apan y Cuauhtec, identificadas en la Sierra de Guadalupe. Estas depresiones están limitadas por fracturamiento y fallas que provienen del poniente y describen un gran arco cóncavo hacia el sur, que afecta a la Sierra Nevada y formó la fosa en el flanco poniente del Cerro Tlálloc (figura 2.7).

Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por material clástico, al oriente, hacia el ex Lago de Texcoco, donde existen depósitos aluviales de granulometría gruesa cerca de las sierras, que se acuñan hacia la zona limítrofe del vaso lacustre, los cuales están constituidos por depósitos clásticos plio-cuaternarios subyacidos por material aluvial y lahares reabajados. Estas depresiones fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea; así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos, mientras que sierras de menor elevación, como la Sierra de Guadalupe, se caracterizan por presentar abanicos aluviales menores. El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin (aproximadamente 600 000 años).

Capítulo 2. Características del área de estudio

El vulcanismo durante el Pleistoceno y Holoceno es de tipo monogenético y formó conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos. La Sierra Chichinautzin es el área en la que se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias al sur de la Cuenca de México. Otra de las áreas de mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias se localiza al oriente y nororiente de Tizayuca-Atzompa-Texcoco, misma que se extiende hasta Ciudad Sahagún-Singuilucan, al norte y nororiente de Apan, Hidalgo.

Durante el Cuaternario continúa el vulcanismo principalmente de composición andesítico-basáltico, reconocido en los cerros Chimalhuacán, Gordo y El Pino y las erupciones basálticas y andesíticas entre Tizayuca y Apan. Las sierras mayores con grandes volcanes, como los de la Sierra Nevada, alcanzaron su máximo desarrollo, formándose extensos abanicos volcánicos.

2.3.1. Estratigrafía

La geología superficial del acuífero Texcoco, está constituida por rocas sedimentarias, volcánicas y en menor proporción intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico hasta el Reciente (figura 2.7). A continuación, se describe cada una de las unidades litológicas de la más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO

Formación Xochicalco (Kx)

Unidad más antigua reconocida y aflora únicamente al suroeste del área, con un espesor que excede los 500 m y está cubierta discordantemente por la formación Morelos. Compuesta por una secuencia de calizas de contenido carbonoso, abundantes vetillas de calcita y nódulos de pedernal. Esta unidad se depositó durante el Aptiense en ambientes marinos de cuenca relativamente profunda (Vazquez y Jaimes, 1989).

Formación Morelos (Km)

Esta unidad está ampliamente expuesta al sur de la Cuenca de México en los estados de Morelos y Guerrero, compuesta por calizas marinas poco profundas con edades del Albiano-Cenomaniano, cuyo espesor máximo es de 900 m y se adelgaza al este y oeste, la formación se superpone a la formación Mexcala a través de una falla (Arce et al., 2019).

Capítulo 2. Características del área de estudio

Formación Cuautla (Kc)

De acuerdo con Vazquez y Jaimes (1989), está conformada principalmente por calcarenitas de estratificación gruesa, con edades del Cenomaniano Tardío-Turoniano Tardío. La formación se distribuye al sur de la Cuenca de México con espesores de 750 a 200 m.

Formación Mexcala (Kmx)

Aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y al noroeste en el cerro La Palma (CONAGUA, 2014). Tienen un espesor máximo de 1 500 m y constituye, constituye una interestratificación de lutitas, limonitas y areniscas A esta unidad se le definió una edad del Turoniense-Maastrichtiense (Arce et al., 2019).

PALEÓGENO

Grupo Balsas (Teob)

Depósitos continentales con un espesor de 500 m, constituidos por conglomerados, areniscas, limolitas, calizas lacustres y depósitos piroclásticos. Dentro de la Cuenca de México se ha localizado un pozo de Texcoco a una profundidad de 2 680 m (Arce et al., 2019). De acuerdo con Vazquez y Jaimes (1989) tiene una edad del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano.

NEÓGENO

Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano (Tomv)

Secuencias volcánicas de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas y aglomerados. En la parte superior están interestratificados y/o cubiertos por derrames lávicos (Vazquez & Jaimes, 1989). En el subsuelo de la Cuenca de México, estas rocas cubren localmente de forma discordante a unidades cretácicas, al Grupo Balsas y formaciones del Plio-Cuaternario (CONAGUA, 2014).

Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv)

Corresponde a rocas volcánicas que se encuentran en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra Guadalupe, Sierra de Las Cruces, Cerro Patlachique y en algunos afloramientos en el norte de Texcoco. Estas rocas están constituidas por una secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas que en algunos lugares

Capítulo 2. Características del área de estudio

se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas (Vazquez y Jaimes, 1989). De acuerdo con la CONAGUA, (2014), esta unidad se encuentra entre 490 y 1 125 m de profundidad en el subsuelo del Ex lago de Texcoco y desde el punto de vista hidrogeológico, se considera el basamento hidrogeológico del acuífero Texcoco.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)

Se refiere al conjunto de rocas extrusivas que representan un segundo periodo magmático, afloran en los flancos de las Sierras Las Cruces, Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados de la cuenca, también coronan las Sierras de Guadalupe y Tepetzotlán; sobreyacen discordantemente a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y están cubiertas por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. La composición de estas rocas varía de andesítica a dacítica (Vazquez y Jaimes, 1989).

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tpcc)

En el subsuelo de la porción sur de la cuenca, estos depósitos constan de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas, cubiertos discordantemente por aluvión del Cuaternario acumulados en fosas tectónicas (Graben de Chalco) y rellenando amplios valles. Su espesor máximo es de 750 m (CONAGUA, 2014).

Formación Tarango (Tpt)

De acuerdo con Vazquez y Jaimes (1989), corresponde a una intercalación de tobas, brechas volcánicas, depósitos de lahar y depósitos fluviales provenientes de la erosión de los complejos del Neógeno Medio y Superior. Las tobas cubren los pies de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y Sierra de las Cruces. De acuerdo con Mosser (1961), datan del Plioceno-Pleistoceno y se estima que tienen un espesor de 300 a 400 m (CONAGUA, 2014).

CUATERNARIO

Formación Llano Grande (Qllg)

Secuencia eruptiva de composición variable de andesitas y riodacitas que forman el volcán del mismo nombre, el cual es ancestro del volcán Iztaccíhuatl. Aflora en la base noroeste de la Sierra Nevada. Esta unidad está cubierta discordantemente por la Formación Telapón e

Capítulo 2. Características del área de estudio

Iztaccíhuatl y sobreyacen rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno (Tomv). Esta formación tiene una edad del Pleistoceno Temprano (Vazquez y Jaimes, 1989).

Formación El Pino (Qpp)

Son secuencias de derrames lávicos con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de caída de composición basáltica, andesítica y traquítica que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y conos cineríticos aislados. Presenta espesores máximos de 750 m en los centros eruptivos y se acuñan hacia la periferia. Esta unidad cubre discordantemente unidades del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y la Formación Llano Grande y está cubierta por las formaciones Chichinautzin y Telapón (CONAGUA, 2014).

Formación Tláloc (Qt)

De acuerdo con la CONAGUA (2014), está compuesta de coladas lávicas que forman parte de la Sierra Río Frío y depósitos de pómez, líticos, surges, flujos de cenizas cristalinas y vítreas. La formación cubre de manera discordante a rocas del Mioceno Medio-Tardío y Plioceno. Data del Pleistoceno y presenta un espesor máximo en el centro de la Sierra Río Frío de 1 800 m el cual se acuña hacia los alrededores (Vazquez y Jaimes, 1989).

Formación Chichinautzin (Qc)

Corresponde al vulcanismo de tipo monogenético que se distribuyen ampliamente al sur de la Cuenca de México con lavas extensas, vesiculares, masivas o lajadas de composición andesítico-basáltica. Su espesor varía de un sitio a otro, no obstante, el espesor máximo es de 1 800 m. Esta unidad cubre discordantemente casi todas las unidades cretácicas y se encuentra interdigitada con depósitos lacustres y aluvión (Vazquez y Jaimes, 1989). De acuerdo con la CONAGUA (2014), la emisión de estos volúmenes de lava interrumpió definitivamente el drenaje hacia el sur que tenía la Cuenca de México.

Depósitos aluviales (Qal)

La obstrucción del drenaje en la cuenca causó una acumulación de depósitos de tipo clástico fluvial relacionados con periodos glaciares y postglaciares del Pleistoceno-Holoceno (CONAGUA, 2014). Estos depósitos están compuestos por material poco consolidado con fragmentos de grava, arena, limos y arcilla, los cuales están interestratificados con tobas de

Capítulo 2. Características del área de estudio

grano fino, derrames lávicos de tipo basáltico y andesítico, conglomerados y brechas. En la parte superior se encuentra interdigitado con los depósitos lacustres del Cuaternario. Los espesores máximos son de alrededor de 500 m, se encuentran en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia las márgenes de la llanura. A esta unidad se le propone una edad del Pleistoceno al Holoceno (Vazquez y Jaimes, 1989).

Depósitos lacustres (Qla)

Agrupar a los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad del volcán Popocatepetl y la Sierra Chichinautzin, los cuales forman una gran antiplanicie lacustre, extendida con una altitud promedio de 2 200 m, desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec. Los espesores varían entre 30 y 300 m, los mayores se presentan en las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco, acuñándose hacia las márgenes de las planicies (Vazquez y Jaimes, 1989).

Compuestos de arcillas bentónicas y montmorillonitas, con carbonato de calcio, diátomeas, ostrácodos e interestratificaciones de ceniza y pómez. Además, se encuentran interdigitados con la formación Chichinautzin y con los depósitos aluviales (CONAGUA, 2014). De acuerdo con Vazquez y Jaimes (1989), tienen una edad de formación de Pleistoceno Temprano al Holoceno. La presencia de suelos, evaporitas y tobas consolidadas sugiere la presencia de climas húmedos y áridos.

En la figura 2.7 se muestra el mapa geológico del área de estudio y dos cortes geológicos (figura 2.8 y 2.9), además en la tabla 2.1 se detalla la secuencia estratigráfica del acuífero Texcoco.

Tabla 2.1. Secuencia estratigráfica del acuífero Texcoco.

Era	Periodo	Época	Clave	Lito-estratigrafía
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qla	Sedimentos lacustres de arcillas bentónicas y montmorillonitas.
		PLEISTOCENO	Qal	Sedimentos aluviales, con fragmentos de grava, arena, limo y arcilla.
			Qc	Lavas de tipo vesicular o masivas de composición andesítico-basáltica de grano fino y medio con fenocristales de olivino y piroxenos en una matriz vítrea y cristalina.
			Qt	Flujos lávicos de composición andesítica y dacítica. También depósitos de pómez, flujos de cenizas cristalinas y vítreas.
			Qpp	Derrames lávicos con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de composición basáltica, andesítica y traquítica.
			Qllg	Secuencia de andesitas y riocitas, así como ceniza vítrea.
	NEÓGENO	PLIOCENO	Tpt	Intercalación de tobas, brechas volcánicas, depósitos de lahar y depósitos fluviales.
			Tpcc	Depósitos de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas.
			Tpv	Rocas volcánicas extrusivas de composición andesítica a dacítica.
		MIOCENO	Tmv	Secuencia de tobas, brechas volcánicas y lavas.
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	Tomv	Secuencia de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados.
		EOCENO	Teob	Constituida por conglomerados, calizas lacustres, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas.
		PALEOCENO		
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	Kmx	Interestratificación de grauvacas, limolitas y lutitas.
			Kc	Calcarenitas de estratificación gruesa.
			Km	Interestratificación de capas gruesas de calizas y dolomías.
		INFERIOR	Kx	Secuencia de calizas con abundantes vetillas de calcita y nódulos de pedernal.

Fuente: elaborado con información de estudios analizados.

Capítulo 2. Características del área de estudio

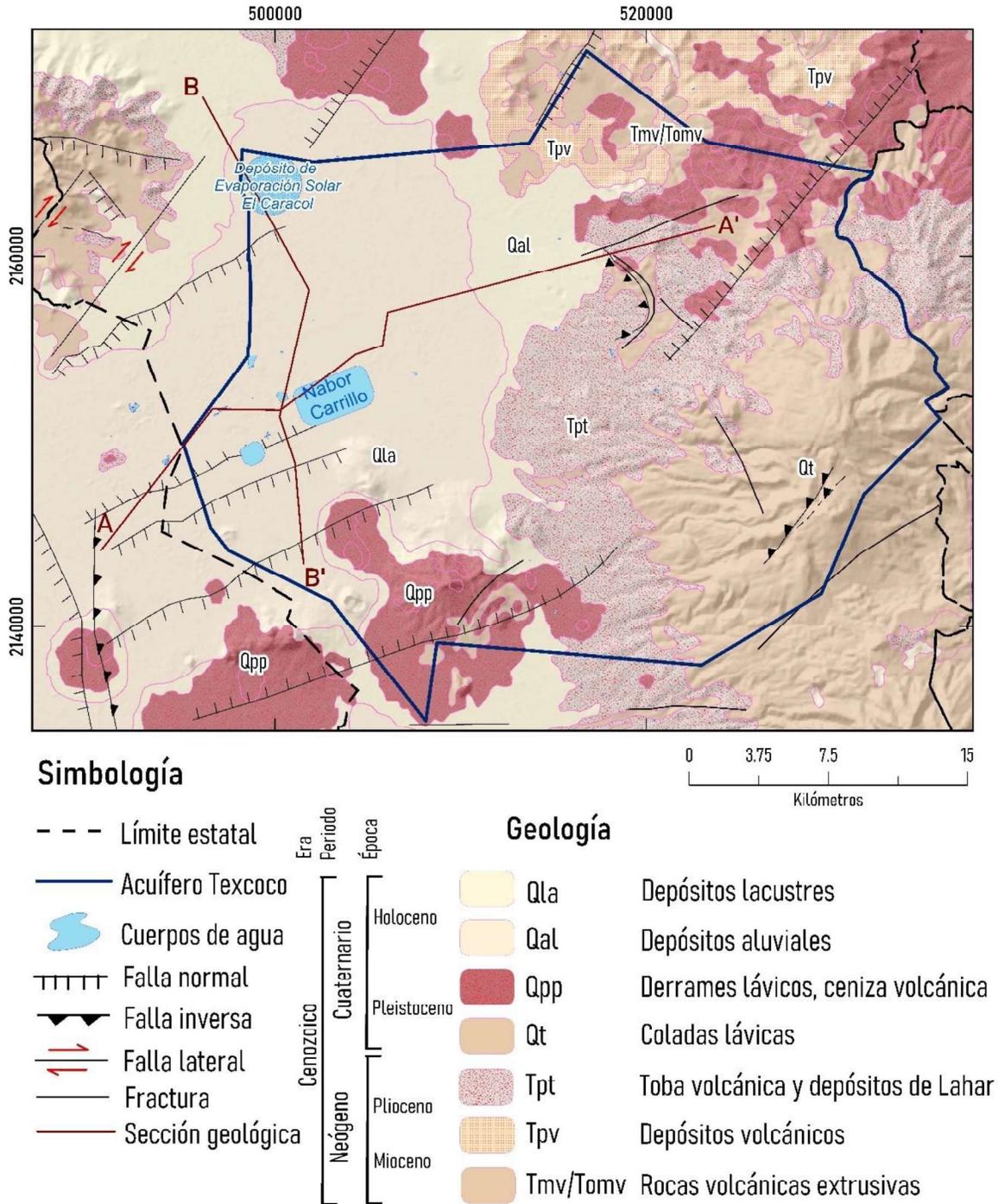
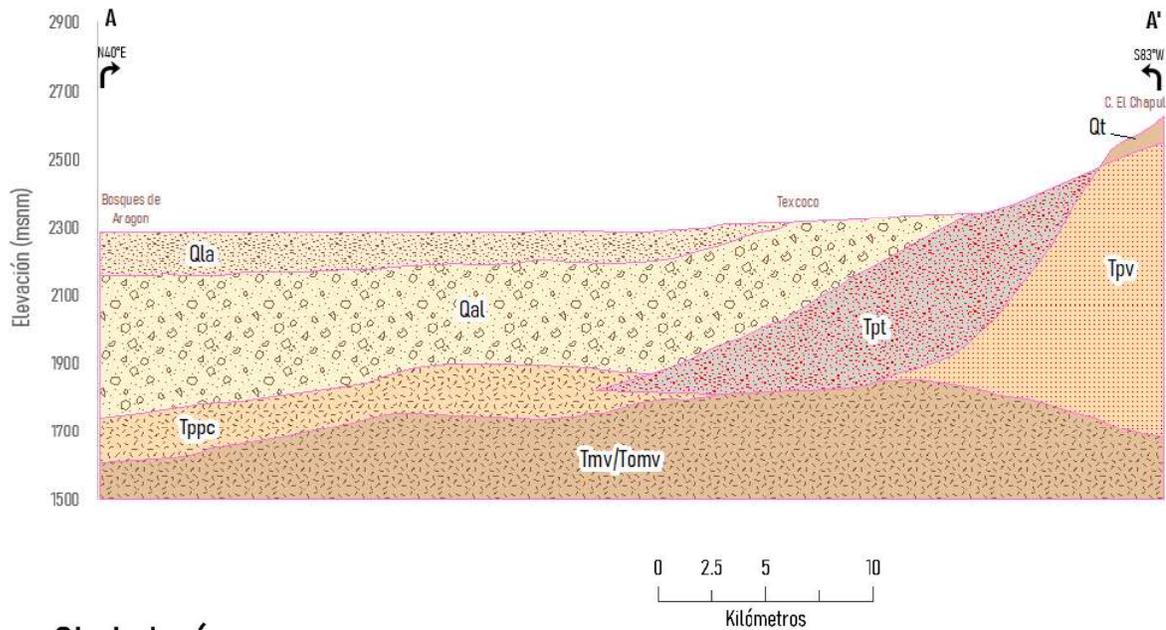


Figura 2.7. Geología superficial del área de estudio (CONAGUA, 2014; Arce et al., 2019).

Capítulo 2. Características del área de estudio

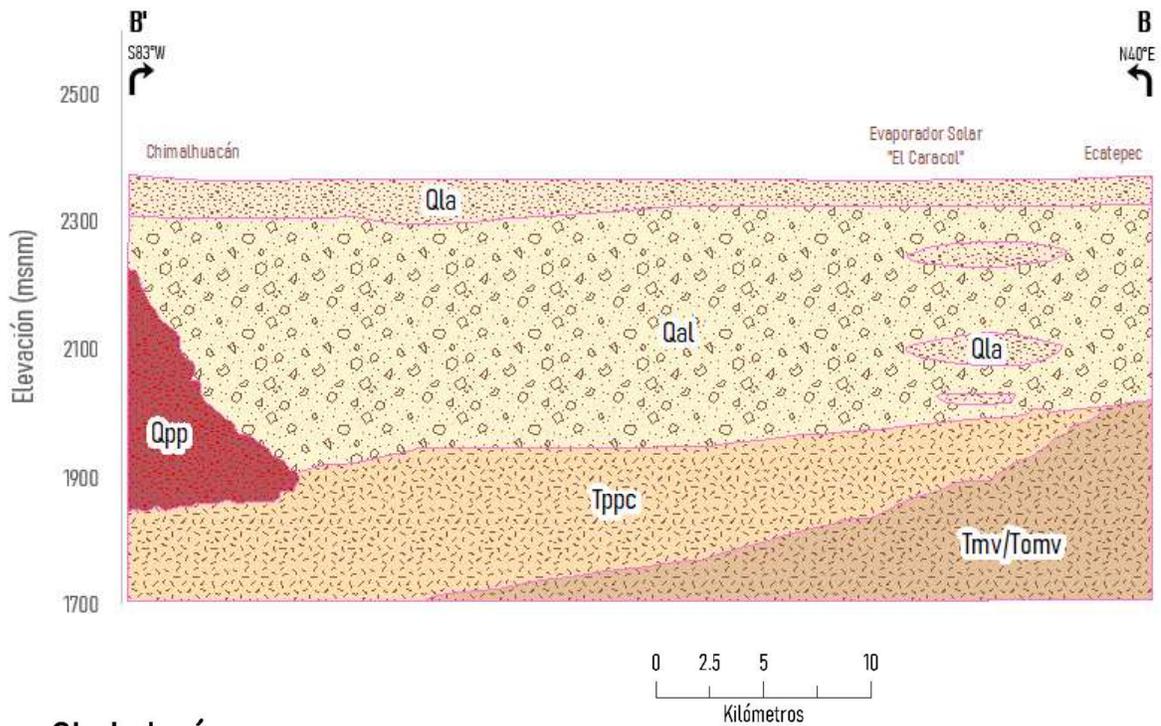


Simbología

Era	Periodo	Época	Clave	Unidades Litoestratigráficas
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qla	Depósitos lacustres
		Pleistoceno	Qal	Depósitos aluviales
			Qt	Coladas lávicas
	Neógeno	Plioceno	Tppc	Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales
			Tpt	Toba volcánica y depósitos de Lahar
		Mioceno	Tpv	Depósitos volcánicos
		Tmv/Tomv	Rocas volcánicas extrusivas	

Figura 2.8. Sección geológica A – A' (Suárez, 2019).

Capítulo 2. Características del área de estudio



Simbología

Era	Periodo	Época	Clave	Unidades Litoestratigráficas
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qla	Depósitos lacustres
			Qal	Depósitos aluviales
	Neógeno	Plioceno	Qpp	Formación Pino
			Tppc	Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales
		Mioceno	Tmv/Tomv	Rocas volcánicas extrusivas

Figura 2.9. Sección geológica B – B' (Suárez, 2019).

2.4. Hidrología superficial

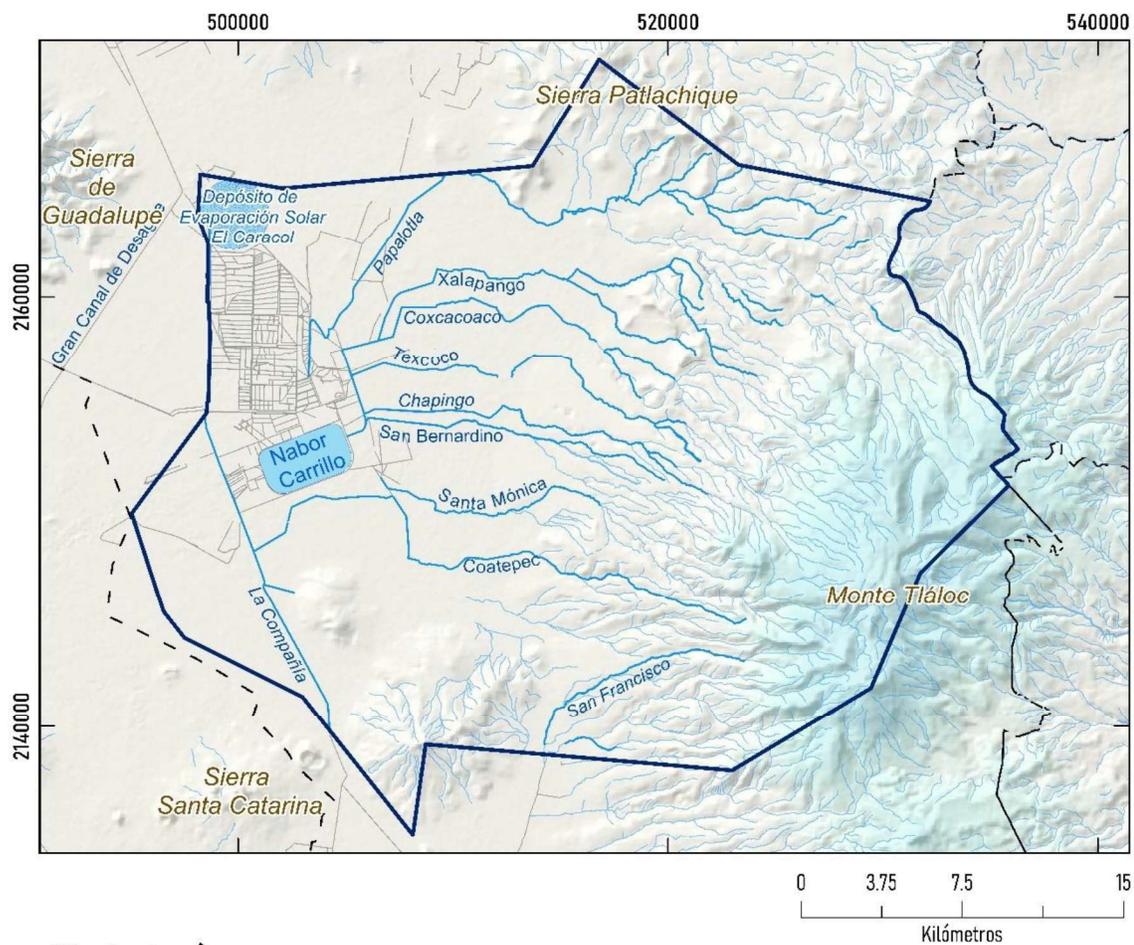
El AT pertenece a la Cuenca de México, en la porción extremo sur de la Región Hidrológica 26, Alto Pánuco; la cuenca es de naturaleza endorreica y drena de forma artificial por obras de ingeniería hacia el Río Tula, en el estado de Hidalgo (CONAGUA-UACH, 2009). El sistema hidrológico está integrado por escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje, el drenaje es de tipo radial centrífugo, dendrítico y dendrítico paralelo (figura 2.10) (CONAGUA, 2005c).

En el área de estudio se identifican 9 cuencas, cuyos cauces principales corresponden a los ríos Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco (CONAGUA-UACH, 2009), todos ellos descienden desde la Sierra Nevada y confluyen en la zona del Ex Lago de Texcoco y su destino final es el Dren Colector del Valle, con las aguas residuales de la Ciudad de México (CONAGUA, 2014).

El lago Nabor Carrillo fue construido en 1956 como parte de un proyecto del gobierno federal para restaurar y aprovechar los recursos de la zona. Para su construcción se aprovechó la compresibilidad de los suelos arcillosos y mediante una batería de pozos se extrajo agua y provocó el hundimiento del terreno (Díaz, 1987). Actualmente recibe aguas residuales de Chimalhuacán, Nezahualcóyotl y Ecatepec, su principal desfogue es el canal La Draga (CONAGUA, 2014).

Con la finalidad de resolver el problema de la salinidad de suelos en el oeste de la región, durante los años cuarenta se construyó un evaporador solar, conocido como “El Caracol” por su forma de espiral. Al principio recibía aguas de lavados de suelos alcalino-salinos con la intención de rescatarlos como suelos agrícolas, lo cual se logró con éxito (Álvarez, 1954). Además, la instalación se utilizaba para regular el nivel de agua del Lago de Texcoco, también como planta de producción de espirulina (alga cianofita resistente a la alta alcalinidad del agua y el suelo) y como punto de extracción de carbonato de sodio, sosa cáustica y sal común (Carranza, 2018). Actualmente el evaporador tiene una superficie de 8 416 km² y se encuentra en desuso (Gaceta del Gobierno, 2015).

Capítulo 2. Características del área de estudio



Simbología

- | | | | |
|-----|-------------------------------|--|---------------------------|
| --- | Límite estatal | | Corriente perenne |
| | Acuífero Texcoco | | Corriente intermitente |
| | Cuerpos de agua | | Canal de aguas residuales |
| | Evaporador Solar "El Caracol" | | |

Figura 2.10. Hidrología superficial del área de estudio. (IFOMEGEM, 2013, INEGI, 2019)

2.5. Hidrología subterránea

De acuerdo con la CONAGUA (2014), se puede definir al AT como un acuífero de tipo libre a semiconfinado heterogéneo y anisótropo. Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas del subsuelo de la región, indican que está conformado en su porción superior por un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución formando un acuitardo de espesor variable cuyo promedio es de 50 m y actúa como confinante o semiconfinante en el centro de la región.

Bajo el material arcilloso se encuentra un paquete de sedimentos aluviales, constituido por intercalaciones de arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y depósitos vulcanoclásticos, que en conjunto presentan permeabilidad media y un espesor promedio de 1 500 m, los materiales permiten la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea por lo que corresponde al acuífero en actual explotación.

Las fronteras y barreras del flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico están conformados por rocas volcánicas cuya base se localiza hasta 2 000 m en el centro del valle y disminuye hacia los márgenes. Las rocas presentan permeabilidad por fracturamiento la cual disminuye a profundidad por la presencia de los conglomerados compactos de la Formación Balsas y la secuencia de lutitas, limolitas y margas que constituyen la Formación Mexcala. Debajo de esta secuencia, las rocas calizas cretácicas alojan un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas, cuya presencia y potencial ha sido demostrado en las perforaciones profundas realizadas en la Cuenca de México.

De acuerdo con la CONAGUA (2005c), el AT se encontraba sometido a una condición de confinamiento y la recarga principal provenía de la infiltración total de agua de lluvia a través de las formaciones geológicas que afloran en el área, principalmente en las elevaciones y recargaba al acuífero mediante flujos subterráneos. La descarga ocurría a través de manantiales localizados en las laderas de las elevaciones y pozos artesianos en la planicie. Con base en Lojero, V (citado en Suárez, 2019), el comportamiento hidrogeológico del acuífero ha cambiado a semiconfinado el cual va perdiendo carga hidráulica debido a la excesiva extracción del agua subterránea mediante pozos de bombeo.

Capítulo 2. Características del área de estudio

2.5.1. Parámetros hidráulicos

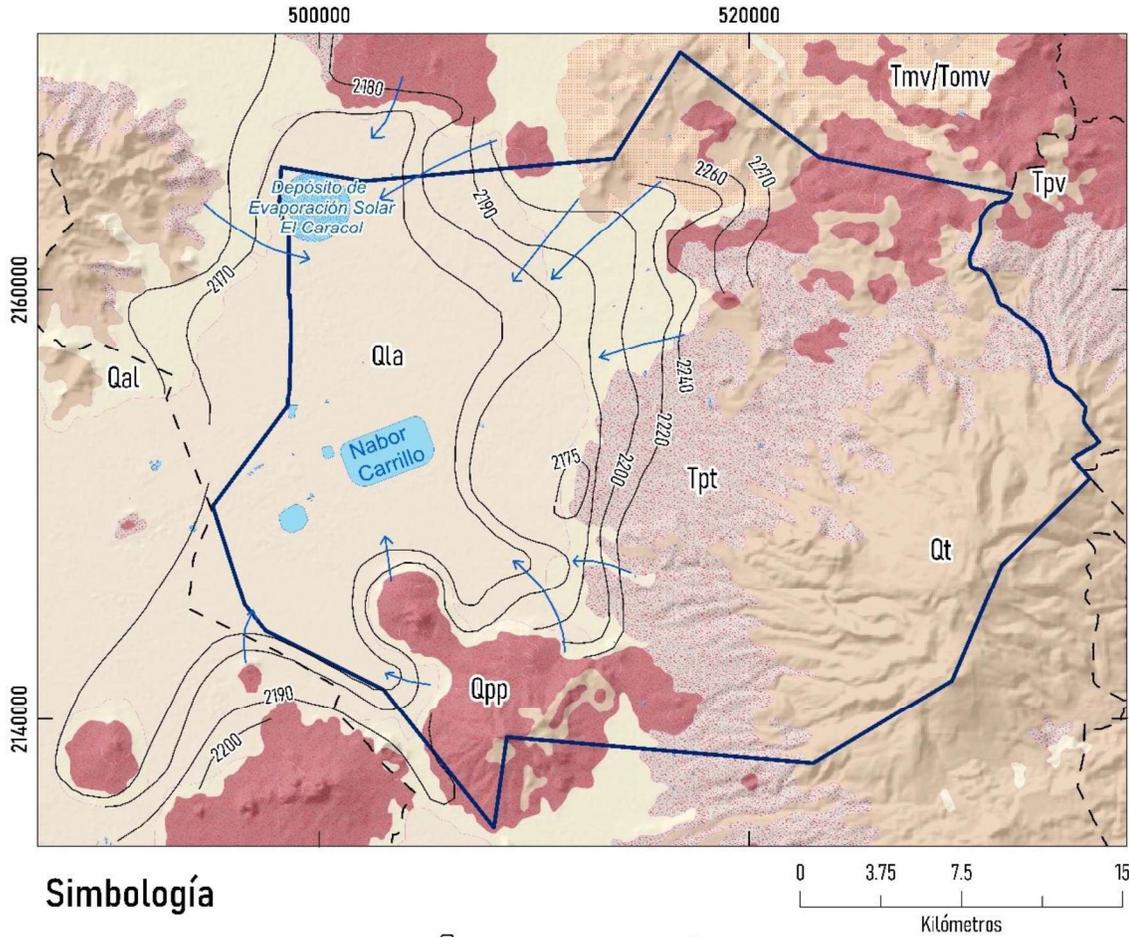
De acuerdo con la CONAGUA (2014), existe información de pruebas de bombeo de larga duración, realizadas tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados y su interpretación por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton, se establece que los valores de transmisividad varían de 2.2×10^{-4} a $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; en tanto que para la conductividad hidráulica (K) se registran valores que oscilan entre 2.3×10^{-6} y $7.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.2 y 65.0 m/d), así como valores de rendimiento específico Sy que varían de 0.08 a 0.2 y de coeficiente de almacenamiento de 0.01 a 0.00001.

2.5.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático del año 2011 registra valores que varían de 2 270 a 2 170 msnm. Las menores elevaciones se registran en la porción oeste del AT, en la zona que circunda el Lago Nabor Carrillo. Las mayores elevaciones (de 2 220 a 2 270 msnm) se registran en el extremo noreste, a lo largo de las estribaciones de la Sierra Patlachique, donde descienden gradualmente hacia el valle, por efecto topográfico (figura 2.11). Al sur del acuífero, en las inmediaciones del cerro Chimalhuachi, la elevación del nivel estático varía de 2 180 a 2 190 msnm, en torno del Cerro El Pino, y hacia el acuífero vecino Chalco-Amecameca.

La dirección del flujo subterráneo muestra una red concéntrica hacia el centro del valle y de acuerdo con Suárez (2019), los sistemas de flujo son de tipo local, indicando recarga en la región montañosa, así como flujos subterráneos de entrada provenientes del acuífero Cuautitlán – Pachuca al norte y el acuífero de la Ciudad de México al suroeste. Finalmente, no se aprecian flujos subterráneos que descarguen hacia otros acuíferos.

Capítulo 2. Características del área de estudio



Simbología

- Límite estatal
- Acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Isolinéa del nivel de agua subterránea
- Dirección del flujo de agua subterránea

Era	Periodo	Época
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno
		Pleistoceno
	Neógeno	Plioceno
		Mioceno

Geología

- Qla Depósitos lacustres
- Qal Depósitos aluviales
- Qpp Derrames lávicos, ceniza volcánica
- Qt Coladas lávicas
- Tpt Toba volcánica y depósitos de Lahar
- Tpv Depósitos volcánicos
- Tmv Rocas volcánicas extrusivas
- Tomv

Figura 2.11. Elevación del nivel estático correspondiente al año 2011 en el área de estudio (CONAGUA, 2014).

Capítulo 2. Características del área de estudio

2.6. Población y desarrollo socioeconómico

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población asentada dentro del acuífero Texcoco, es de 3 277 674 habitantes.

Los municipios más poblados son Nezahualcóyotl con 1 077 208 habitantes, Chimalhuacán con 705 193 habitantes y Texcoco con 277 562 habitantes. En la tabla 2.4 y la figura 2.12 se presenta la distribución de la población que habita en los municipios comprendidos dentro de los límites administrativos del acuífero, de acuerdo con la información del INEGI para el conteo de la población del año 2005, El Censo de Población y Vivienda del año 2010, el Conteo de población del año 2015 y el Censo de Población y Vivienda del 2020.

El desarrollo histórico y económico de la Cuenca de México ha ejercido un papel trascendental en el país, debido a su alto desarrollo industrial y poblacional, creando al mismo tiempo una demanda significativa de agua en diversas zonas de la Cuenca, lo que ha ocasionado, de forma continua en las últimas décadas un incremento del número de captaciones de agua subterránea, con el consecuente aumento en los volúmenes de extracción y el desequilibrio del sistema hidrológico natural.

Aproximadamente el 24 % de la población se ocupa en el comercio, el 20 % se dedica a alguna actividad dentro de la industria manufacturera, el 7 % a la industria de la construcción, el 6 % se ocupa en actividades propias del transporte, correos y almacenamiento, el 1.3 % se dedica al sector agrícola, forestal y ganadero, mientras que el resto de la población se dedica a los servicios, educativos, profesionales, apoyo a negocios, salud y de asistencia social, esparcimiento y culturales, hoteles y restaurantes, financieros y seguros, inmobiliarios y alquiler de bienes muebles y actividades del gobierno. El principal uso del agua subterránea del acuífero Texcoco, es el público urbano, con el 70 % del volumen total que se extrae del acuífero.

Capítulo 2. Características del área de estudio

Tabla 2.2. Número de habitantes en los municipios comprendidos dentro de los límites administrativos del acuífero Texcoco, Estado de México.

Municipios	Conteo 2005	Censo 2010	Conteo 2015	Censo 2020
Nezahualcóyotl	1 140 528	1 110 565	1 039 867	1 077 208
Chimalhuacán	525 389	614 453	679 811	705 193
Texcoco	209 308	235 151	240 749	277 562
Chicoloapan	170 035	175 053	204 107	200 750
La Paz	232 546	253 845	293 725	304 088
Ixtapaluca	429 033	467 361	495 563	542 221
Atenco	42 739	56 243	62 392	75 489
Tepetlaoxtoc	25 523	27 944	30 680	32 564
Chiconcuac	19 656	22 819	25 159	27 692
Chiautla	22 664	26 191	29 159	30 045
Papalotla	3 766	4 147	3 963	4 862
Total	2 821 187	2 993 772	3 105 559	3 277 674

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

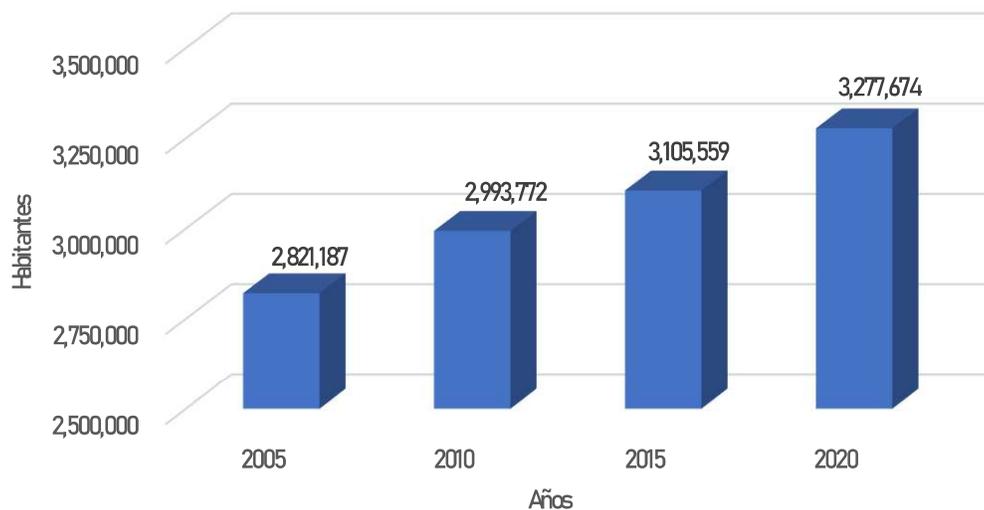


Figura 2.12. Evolución de la población en el acuífero Texcoco (Elaborado con datos del INEGI, 2021).

2.7. Análisis de los estudios previos en el acuífero Texcoco

A lo largo del tiempo se han realizado estudios orientados en el diagnóstico, cuantificación, cualificación y manejo sustentable del agua subterránea en el acuífero Texcoco, a continuación, se mencionan de forma cronológica aquellos en los que se estimó la recarga.

En el **año 2002**, la CONAGUA publicó el informe de disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, es importante resaltar que en este año el acuífero tenía un límite administrativo diferente del cual se desconoce la superficie, pero, en él se localizaban 12 municipios del Estado de México y la Delegación Iztapalapa del entonces Distrito Federal.

Para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea se aplicó el procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, el cual la recarga vertical no fue considerada, justificando que debido a la estratigrafía del acuífero constituida por un estrato de arcilla con un espesor promedio de 60 m la cual no es capaz de recibir recarga vertical, bajo este criterio la recarga inducida no fue estimada. En cuanto a las entradas por flujo subterráneo, se establecieron 20 celdas de entrada obteniendo un volumen de 48.6 hm³/año.

Por otra parte, como descargas del acuífero fue descartada la evapotranspiración, argumentando que la profundidad del nivel piezométrico es superior a los 10 m y en la parte superior existe un acuitardo que impide la evapotranspiración. Las descargas que fueron consideradas fueron mediante el bombeo de agua subterránea y salidas por flujos subterráneos, para el primero se utilizó el censo de extracción del año 1990 realizado por la empresa GRAVAMEX, en él se reporta un volumen de 466.1 hm³/año, el cual es muy elevado debido a que incluye extracciones de la delegación Iztapalapa y Ecatepec. Como descargas por flujo subterráneos hacia el acuífero Cuautitlán – Pachuca se obtuvo un volumen de 1.22 hm³/año.

Mediante el balance hídrico del acuífero se obtuvo una recarga total de 48.6 hm³/año y un cambio de almacenamiento de -418.7 hm³/año, por lo que el acuífero se reportó en condición de sobreexplotación, y de acuerdo con el cálculo de la disponibilidad, para el año 2002 el acuífero Texcoco se reportaba en un déficit de -49.94 hm³/año.

Posteriormente en el **año 2006** la CONAGUA elaboró el estudio de modelación para determinar el comportamiento del acuífero Texcoco, en él se especifica que la superficie del

Capítulo 2. Características del área de estudio

acuífero es de 938 km² y dentro de sus límites comprende a 11 municipios del Estado de México. A través del balance hídrico del suelo se obtuvo la infiltración para la superficie total del acuífero y con el balance de aguas subterráneas se obtuvo la recarga total para los años 1990 y 2006 en una superficie de 600 km².

En ese orden de ideas, el balance hídrico del suelo reportó una precipitación media anual de 613.5 hm³/año y mediante el método de Turc se obtuvo una evapotranspiración real (ETR) de 514.4 hm³/año. El escurrimiento superficial fue calculado con la metodología de la NOM-011-CNA, con un coeficiente de escurrimiento (C_e) de 0.091 se obtuvo un escurrimiento de 55.9 hm³/año. Finalmente se estimó una infiltración de 43.2 hm³/año.

Por su parte, para el balance hídrico del acuífero a través del cociente del volumen de infiltración y precipitación se obtuvo un coeficiente de infiltración de 0.07 que fue multiplicado por la precipitación media anual del área de balance para obtener una recarga vertical de 25.4 hm³/año y, en relación con las entradas por flujo subterráneo se obtuvo un volumen de 23.7 hm³/año, por lo que se reportó una recarga natural de 49.1 hm³/año. Pero en este estudio también se calculó la recarga inducida mediante un coeficiente de infiltración de 0.3 y el volumen de todos los usos de agua, obteniendo un volumen de 35.9 hm³/año para 1990 y de 99.8 hm³/año para el 2006. Dicho lo anterior, la recarga total de 1990 fue de 85 hm³/año y 98.8 hm³/año para el 2006.

Como descargas del acuífero, el volumen de extracciones por bombeo se obtuvo del censo realizado en 1990 con un volumen de 141.13 hm³/año de los cuales 10.43 hm³/año corresponde a la descarga comprometida por manantiales. El censo del 2006 se reporta un volumen de 183.02 hm³/año de los cuales 10.43 hm³/año también corresponden a descargas por manantiales. Además, se identificaron descargas por flujo subterráneo hacia el acuífero de la Ciudad de México con un volumen de 8.9 hm³/año.

Finalmente, se obtuvo un volumen total de descarga de 150.2 hm³/año para 1990 y de acuerdo con la ecuación de balance, se calculó un cambio de almacenamiento de -65.2 hm³/año. Para el año 2006 se obtiene una descarga total de 191.9 hm³/año y un cambio de almacenamiento de -92.1 hm³/año.

Capítulo 2. Características del área de estudio

En el **año 2007**, la CONAGUA elaboró el apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del acuífero Texcoco, se realizó el balance hídrico del suelo y el balance hídrico del acuífero en las mismas superficies del estudio del año 2006.

Para ese año reportaron una precipitación media anual de $581.6 \text{ hm}^3/\text{año}$, nuevamente a través del método de Turc se calculó una evapotranspiración real (ETR) de $484.7 \text{ hm}^3/\text{año}$, con la aplicación de la NOM-011-CNA-2000 se determinó un coeficiente de escurrimiento (C_e) de 0.0789 con el que calculó un escurrimiento superficial de $45.9 \text{ hm}^3/\text{año}$. Finalmente, se obtuvo una infiltración de $51 \text{ hm}^3/\text{año}$.

De acuerdo con el volumen de infiltración y precipitación se obtuvo un coeficiente de infiltración de 0.087, con el que se calculó una recarga vertical de $30.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, por su parte, las entradas por flujo subterráneo corresponden a $20.20 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que la recarga natural es de $50.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, además se consideró un volumen de $32.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ como recarga inducida de los cuales $12.60 \text{ hm}^3/\text{año}$ provienen del volumen destinado al riego y otros usos al que se le aplicó un coeficiente de infiltración de 0.25 y $19.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ del uso público urbano al que se le aplicó un coeficiente de infiltración de 0.15, dicho lo anterior para el 2007 se reportó una recarga total de $82.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Como descargas del acuífero, nuevamente se consideró el censo de extracciones del 2006, con un volumen de $184.2 \text{ hm}^3/\text{año}$ y $10.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ de descarga comprometida por manantiales, en este estudio no consideraron las descargas por flujo subterráneo hacia otros acuíferos, por lo que la descarga total para fue de $194.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Finalmente, de acuerdo con la ecuación de balance, se obtiene un cambio de almacenamiento de $-112 \text{ hm}^3/\text{año}$, y de acuerdo con la ecuación de disponibilidad media anual de agua subterránea se reportó un déficit de $-125.89 \text{ hm}^3/\text{año}$, nuevamente el acuífero se reportó en condición de sobreexplotación.

Para el **año 2009**, la CONAGUA y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), elaboraron un estudio con el objetivo de diseñar un programa de acciones a corto, mediano y largo plazo para el manejo sustentable del acuífero. En dicho estudio reportan un pequeño aumento en la superficie del acuífero de 939.04 km^2 en la que realizaron el balance hídrico del suelo y en una superficie de 610.27 km^2 realizaron el balance hídrico del acuífero.

Capítulo 2. Características del área de estudio

En el balance hídrico del suelo reportaron una precipitación media anual de 611.06 hm³/año, mediante el método de Turc se obtuvo una evapotranspiración real (ETR) de 496.57 hm³/año y a través de la NOM-011-CNA-2000 se obtuvo un coeficiente de escurrimiento (C_e) de 0.105 con el que se calculó un escurrimiento superficial de 64.47 hm³/año. Finalmente, la infiltración se calculó de manera indirecta sustituyendo los componentes en la ecuación de balance y obtuvo 50.02 hm³/año.

Una vez conocida la infiltración se calculó el coeficiente de infiltración de 0.082 el cual multiplicado por la precipitación promedio del área de balance dio como resultado una recarga vertical de 29.25 hm³/año como parte del balance hídrico del acuífero. Además, se calculó 18.08 hm³/año de entradas por flujo subterráneo por lo que la recarga natural fue de 47.33 hm³/año. Como recarga inducida se reportó un volumen de 55.07 hm³/año de los cuales 3.96 hm³/año provienen del volumen de manantiales al que se le aplicó un coeficiente de pérdida de 0.38 y 51.78 hm³/año del volumen correspondiente a todos los usos de agua subterránea a los que se les aplicó un coeficiente de pérdida de 0.30. Dicho lo anterior para el 2009 se reporta una recarga total de 103.1 hm³/año.

Como descargas del acuífero se consideró el volumen del censo de aprovechamientos del 2006, y se estimó un volumen de descargas por flujo subterráneo hacia el acuífero de la Ciudad de México de 3.8 hm³/año, por lo que el volumen de descarga total ascendió a 186.8 hm³/año. De acuerdo con la ecuación de balance, para el 2009 se obtuvo un cambio de almacenamiento -83.8 hm³/año.

Por su parte, Escobar (2010), analizó la sobreexplotación del acuífero Texcoco en el **año 2010**, mediante el balance hídrico del suelo y el acuífero para elaborar e implementar un plan de manejo sustentable del acuífero, los métodos de balance fueron realizados en una superficie de 939 km², es decir la poligonal administrativa del acuífero.

En el balance hídrico del suelo, Escobar retoma los volúmenes de precipitación, evapotranspiración real, escurrimiento superficial e infiltración reportados en el informe de la CONAGUA y la UACH del año 2009.

Por su parte, en el balance hídrico del acuífero consideró el volumen infiltración como recarga vertical, el cual es de 50.02 hm³/año, también retoma el volumen de entradas por

Capítulo 2. Características del área de estudio

flujos subterráneos del 2009, el cual es de $18.1 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que la recarga natural fue de $68.12 \text{ hm}^3/\text{año}$. Como recarga inducida un volumen de $56.72 \text{ hm}^3/\text{año}$ de los cuales $17.97 \text{ hm}^3/\text{año}$ provienen del volumen de agua superficial y subterránea destinado a la agricultura al que se le aplicó un coeficiente de pérdida de 0.38 y $38.25 \text{ hm}^3/\text{año}$ que provienen del volumen de agua subterránea destinado al uso público urbano al que se le aplicó un coeficiente de pérdida de 0.30. De acuerdo con lo anterior, en el 2010 se reporta una recarga total de $124.8 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Como descargas del acuífero se consideró el censo del año 2006, y las salidas por flujo subterráneo del 2009, por lo que el volumen de descarga total corresponde a $186.8 \text{ hm}^3/\text{año}$. Finalmente, mediante la aplicación de la ecuación de balance hídrico se determinó un cambio de almacenamiento del acuífero de $-62 \text{ hm}^3/\text{año}$. De otro modo, en este estudio también se determinó el cambio de almacenamiento mediante la evolución del nivel piezométrico y un coeficiente de almacenamiento (S_y) del 6%, lo anterior no queda muy claro, puesto que se desconoce la distribución de los abatimientos y el valor del coeficiente de almacenamiento, sin embargo, el cambio de almacenamiento por esta vía resultó de $-67.61 \text{ hm}^3/\text{año}$.

En el **año 2014** la CONAGUA, publicó la determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, en este informe se da a conocer una nueva superficie del acuífero y es la que se mantiene hasta la actualidad la cual es de 934 km^2 y dentro de sus límites comprende 14 municipios del Estado de México. En este estudio se realizó el balance hídrico del acuífero en una superficie de 700 km^2 la cual corresponde al área con mayor cantidad de información y aprovechamientos subterráneos.

A diferencia de los informes anteriores de la CONAGUA, en este la recarga vertical fue la última variable en calcularse, la cual se obtuvo de forma indirecta al despejarse de la ecuación de balance. Para ello, primero se calcularon las entradas por flujo subterráneo mediante 22 celdas de entrada y con diferentes valores de transmisividad establecidos de acuerdo con sus características hidrogeológicas se obtuvo un volumen de $38.7 \text{ hm}^3/\text{año}$.

En cuanto a la recarga inducida se modificó el procedimiento y mediante un coeficiente de infiltración del 2% para las arcillas que componen el subsuelo de la región, de esta manera se obtuvo un volumen de $5.3 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los cuales $2.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ corresponden al volumen

Capítulo 2. Características del área de estudio

de agua superficial y subterráneo destinado al uso agrícola y $2.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ que corresponde al volumen destinado al uso público urbano.

Para calcular la recarga vertical fue necesario determinar las descargas del acuífero, para ello se consideró el censo de aprovechamientos del 2006, en el que se reporta un volumen de $183.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ de extracción por bombeo y $10.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ por descarga comprometida a manantiales, por lo que descarga total es de $193.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, es importante mencionar que en este informe se hizo una sobreestimación de la descarga, ya que, de acuerdo con el censo del 2006 en los $183.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ ya están contemplados los $10.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ de manantiales. Este informe descarta a las salidas por flujo subterráneo.

El cambio de almacenamiento se obtuvo mediante la evolución del nivel piezométrico y considerando un coeficiente de almacenamiento promedio (S_y) de las unidades hidroestratigráficas, por lo que se obtuvo un cambio de almacenamiento de $-48.4 \text{ hm}^3/\text{año}$. Posteriormente se estimó la recarga vertical y se obtuvo un volumen de $101.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por lo que la recarga natural fue de $139.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ y la recarga total de $145.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. También, de acuerdo con el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas se reportó un déficit de $-111.77 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Sobre el estudio anteriormente mencionado se han publicado 4 actualizaciones, en las que únicamente se hace la actualización del volumen concesionado de aguas subterráneas en el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, la primera actualización fue en el 2015, en el que se reporta el mismo déficit del año 2014, posteriormente en los años 2018, 2019 y 2020 se reporta un déficit de $-111.86 \text{ hm}^3/\text{año}$.

En años más recientes, Suárez (2019), realizó el modelo matemático de flujo del acuífero Texcoco del **año 2019**, como una herramienta de gestión y planificación para el desarrollo sustentable de la región, en el que estimó la recarga mediante el método de balance hídrico para los años 2006 y 2018, en una superficie de 554.38 km^2 , la cual corresponde al área con mayor cantidad de información.

Suárez (2019), identifica una recarga vertical de $23.88 \text{ hm}^3/\text{año}$, la cual se calculó considerando una precipitación media anual de $359.79 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el área de balance y aplicando diferentes coeficientes de infiltración para las unidades hidroestratigráficas, del

Capítulo 2. Características del área de estudio

7.05% para las unidades UH-2 y UH-6 y del 20% para las unidades UH-4 y UH-5. Suárez consideró que en la unidad UH-1 no existe recarga vertical ni recarga inducida debido a las características hidrogeológicas del acuitardo.

Por otro lado, obtuvo un volumen de 74.15 hm³/año como entradas por flujo subterráneo de los cuales 33.55 hm³/año provienen de la zona montañosa del área de estudio y 40.5 hm³/año del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Dicho lo anterior, la recarga total del acuífero para el 2006 y 2018 fue de 98.03 hm³/año.

Por su parte, como descargas del acuífero se consideró el censo del 2006 de 183.02 hm³/año y el volumen del REPDA del 2018, el cual fue de 178.40 hm³/año, finalmente de acuerdo con la ecuación de balance hídrico se obtuvo un cambio de almacenamiento de -84.99 hm³/año para 2006 y de -80.36 hm³/año para el 2018.

Los estudios anteriormente mencionados, exponen la sobreexplotación en la que se encuentra el acuífero Texcoco, así como las incertidumbres que se presentan al determinar cada una de las variables de las ecuaciones de balance hídrico. En la tabla 2.3 se muestra una síntesis de todos los resultados obtenidos, los cuales presentan inconsistencias en los volúmenes de extracción, así como en las entradas al sistema de forma natural e inducida, debidos a la naturaleza de los métodos implementados, la comprensión del sistema acuífero, y también, por los cambios en sus límites administrativos que ha presentado el acuífero, así como en la definición de sus parámetros hidráulicos.

Tabla 2.3. Estimaciones previas de la recarga realizadas en el acuífero Texcoco.

Autor	CONAGUA 2002	CONAGUA 2006	CONAGUA 2007	CONAGUA- UACH, 2009	Escobar, 2010	CONAGUA, 2014	Suárez, 2019
Superficie de balance (km²)	-	600	600	610.2	939	700	554.3
Temporalidad	-	1990 2006	2007	2009	2010	2006-2011	2006 2018
Precipitación (hm³/año)	-	613.5	581.6	611.0	611.0	-	606.1
Evapotranspiración(hm³/año)	-	514.4	484.7	496.5	496.5	-	-
Escurrimiento (hm³/año)	-	55.9	45.9	64.4	64.4	-	-
Infiltración (hm³/año)	-	43.2	51	50.0	50.0	-	-
Recarga vertical	-	25.4	30.3	29.2	50.0	101.1	23.8
Entrada subterránea	48.6	23.7	20.2	18.1	18.1	38.7	74.1
Recarga inducida	-	35.9 50.7	32.1	55.7	56.7	5.3	-
Recarga total (hm³/año)	48.6	85.0 99.8	82.6	103.1	124.8	145.1	98.0
Extracción (bombeo)	466.1	130.8 172.5	184.2	172.6	172.6	183.1	183.0 178.4
Descarga comprometida	-	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	-
Salidas subterráneas	1.22	8.9	-	3.8	3.8	-	-
TOTAL (hm³/año)	467.3	150.2 191.9	194.6	186.8	186.8	193.5	183.0 178.4
BALANCE DEL ACUÍFERO (hm³/año)	-418.7	-65.2 -92.1	-112	-83.8	-62	-48.4	-84.9 -80.3

Fuente: elaboración propia con datos de los estudios analizados.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Recarga de agua subterránea

De acuerdo con Healy (2010), la recarga de agua subterránea puede ser definida como el flujo de agua que llega a la superficie freática constituyendo una adición al almacenamiento de agua subterránea. Otros autores como Lerner et al. (1990), la definen como el agua que llega a un acuífero desde cualquier dirección (arriba, abajo o lateralmente) dependiendo del tipo de acuífero. Generalmente se expresa como un flujo volumétrico, en términos de volumen por unidad de tiempo (L/T o m³/día (Custodio y Llamas, 1983).

Capítulo 3. Marco teórico

La fuente natural de recarga en un acuífero es la infiltración de la precipitación, aunque también existen distintas formas, las principales son:

- a) **Recarga directa o difusa:** agua principalmente proveniente de la precipitación que es añadida al almacenamiento de agua subterránea a través de la infiltración directa en la zona no saturada cuando alcanza su capacidad de retención de agua (Kebede, 2013).
- b) **Recarga concentrada o indirecta:** se define como recarga procedente de la infiltración de agua de ríos, canales, lagos, playas y zonas remotas (Scanlon et al., 2006).
- c) **Flujos subterráneos:** mediante transferencias de otras unidades hidrogeológicas o acuíferos.
- d) **Retorno de riegos y canales:** producto de excesos en riegos o las pérdidas en los canales de distribución.
- e) **Recarga urbana:** ocurre a partir de las redes de abastecimiento, así como desagües pluviales y drenajes que presentan fugas (Lerner, 1990).

Sin embargo, se conocen otras definiciones sobre la recarga que no están relacionadas a la fuente origen, sino en su cuantificación, entre ellas se encuentran:

- a) **Recarga potencial:** se refiere a aquella parte del agua precipitada, que una vez pasando la zona radicular se infiltra y puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon et al., 2002).
- b) **Recarga total:** corresponde al volumen de agua que recibe un acuífero, en un intervalo de tiempo específico (DOF, 2015).

3.2. Métodos para estimar la recarga de agua subterránea

Es importante estimar la recarga, para ello existen diferentes métodos que la cuantifican en una unidad definida y en diferentes periodos. Dado que no existen métodos directos de medición de la recarga, surge la necesidad de determinar un valor a partir de diferentes métodos indirectos los cuales tiene sus limitaciones de distinta naturaleza. En este sentido, es recomendable estimar de un acuífero por más de un método, esto permitirá disminuir la incertidumbre de los resultados (Healy, 2010).

Capítulo 3. Marco teórico

De acuerdo con Healy (2010), existen diferentes métodos que permiten estimar la recarga de agua subterránea a través de diferentes visiones, entre ellos encontramos a los siguientes:

- a) **Métodos de modelación:** proporcionan una visión sobre el funcionamiento del sistema hidrológico mediante la identificación de factores que influyen en la recarga. Algunos métodos de modelación están basados en la ecuación de balance hídrico, por otro lado, aquellos que no se basan en la ecuación de balance hídrico generalmente emplean ecuaciones que definen a la recarga en función de la precipitación además de otros datos climáticos o propiedades de las unidades hidrológicas.
- b) **Métodos basados en información de agua superficial:** métodos aplicados comúnmente para estimar tasas de recarga en regiones húmedas y subhúmedas debido a la abundancia de datos de flujo de corriente y la disponibilidad de software para analizar estos datos. Algunos de estos métodos no fueron desarrollados principalmente para la estimación de la recarga, en cambio, fueron desarrollados con fines del dimensionamiento de alcantarillas, aberturas de puentes, por lo que la estimación resulta como subproducto de estos métodos, sin embargo, no disminuye la utilidad y aplicabilidad de estos.
- c) **Métodos físicos para la zona saturada y no saturada:** las estimaciones pueden obtenerse a partir de la medición del flujo de agua descendente o el cambio en el almacenamiento de agua dentro de la zona no saturada. En general, estos métodos producen estimaciones de drenaje y pueden dividirse en dos clases: los métodos de balance hídrico y los métodos basados en la ecuación de Darcy. Su aplicación suele ser costosa y requiere una instrumentación intensiva que es susceptible a las inexactitudes de medición.
- d) **Métodos de trazadores químicos:** los trazadores generalmente son iones, isótopos o gases que se mueven con el agua y pueden ser detectados en el medio, el trazador más común para estimar la recarga es el cloro. Estos métodos tienen una amplia variedad de usos en la hidrología debido a que proporcionan estimaciones cuantitativas y cualitativas de la recarga. También, obtienen estimaciones puntuales y espaciales, así como la identificación de fuentes de recarga e información sobre el tiempo que el agua subterránea tiene almacenada en el acuífero, es decir su edad.

- e) **Métodos de balance hídrico:** un balance hídrico es una contabilización de los movimientos de entrada, salida del agua y de los cambios de almacenamiento dentro de un volumen de control. Estos métodos son universales y adaptables a cualquier sistema hidrológico, además son aplicables en cualquier escala espacial y temporal. Los métodos de balance hídrico representan la mayor clase de técnicas para estimar la recarga.

El balance hídrico es fundamental, ya que subyace a diferentes herramientas para cuantificar el caudal, la humedad del suelo o la disponibilidad de agua. A menudo se expresa como una ecuación que relaciona las entradas, salidas y almacenamiento de agua en una unidad de balance (Kampf et al., 2020) además, está basado en el principio de conservación de las masas, que establece que, para cualquier unidad en cualquier periodo, la diferencia entre entradas y salidas estará condicionada por el volumen de agua almacenada (Shulz y García 2015).

En la ecuación de balance hídrico, los insumos más importantes son: precipitación, el movimiento del agua a la atmósfera (evapotranspiración), el flujo de los arroyos (escurrimiento) y las exportaciones de agua a través de aguas subterráneas (salidas por flujo subterráneo) o extracciones artificiales realizadas por el ser humano. (Kampf et al., 2020).

De acuerdo con Shulz y García (2015), una vez que se ha determinado la unidad de balance hídrico se puede aplicar la ecuación general de balance hídrico, como se expresa en la ecuación 3.1.

$$P + Q_{SI} + Q_{ul} - ET - Q_{SO} - Q_{uO} - \Delta S - V = 0 \quad (3.1)$$

Dónde, P es la precipitación, Q_{SI} equivale a las entradas por agua superficial, Q_{ul} corresponde a las entradas de agua subterránea, ET es la evapotranspiración, Q_{SO} corresponde a las descargas artificiales de agua superficial, Q_{uO} equivale a las salidas de agua subterránea, ΔS es volumen de agua almacenada y V es la diferencia o residual.

Capítulo 3. Marco teórico

De acuerdo con Rushton (1988), el **balance hídrico del suelo** han demostrado ser valioso para estimar la **recarga potencial**, a través del cambio de almacenamiento del suelo el cual se expresa en la ecuación 3.2:

$$\Delta S = P - RO - ET \quad (3.2)$$

Dónde, ΔS es el cambio de almacenamiento del suelo, P es la precipitación, RO es el escurrimiento y ET la evapotranspiración.

En un cálculo estándar, el volumen de agua necesario para saturar completamente el suelo se denomina déficit de humedad del suelo. Cuando el cambio de almacenamiento del suelo es positivo, el déficit de humedad del suelo se reduce. En otras ocasiones, cuando no hay precipitaciones, es negativo, lo que conduce a un aumento del déficit de humedad del suelo. En términos de recarga, la condición importante es cuando el déficit de humedad del suelo es lo suficientemente pequeño como para que la cantidad de agua disponible para cambiar el almacenamiento sea mayor que el déficit de humedad del suelo. Después de reducir el déficit de humedad del suelo a cero, el exceso de agua se estancará en la superficie del suelo, o el suelo se vuelve de drenaje libre y el exceso de agua se transmite hacia abajo como recarga potencial.

El **balance hídrico del acuífero** para estimar la **recarga total** se establece en el apéndice B de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, donde se especifica el método para determinar la recarga total que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado y se expresa mediante la ecuación 3.3.

$$Recarga\ Total = \Delta S + Dt \quad (3.3)$$

Dónde la *recarga total*, es la suma de todas las entradas al acuífero principalmente de tipo: vertical, flujo subterráneo, por retornos de riego y fuentes de abastecimiento. Para obtener un valor representativo de la recarga se plantea realizar el balance en un intervalo de varios años en el que existan periodos secos y lluviosos (DOF, 2015).

Capítulo 3. Marco teórico

ΔS , es el cambio de almacenamiento en el acuífero en el intervalo de tiempo considerado para el balance. Este se determina a partir de la evolución de los niveles de agua subterránea y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero (S_y), actualmente existen varios métodos para medir este parámetro como el de laboratorio, de campo y empírico (Guerrero et al., 2018). Sin embargo, varía en función de las condiciones intrínsecas del acuífero, como la profundidad del nivel freático y la heterogeneidad del suelo (Fetter, 2001), así como pruebas de bombeo y/o con base en consideraciones relativas al tipo y litología del acuífero (DOF, 2015).

D_t , es la descarga total y se estima como la suma de los volúmenes descargados de forma natural o por medio de captaciones, entre ellos se encuentran (DOF, 2015):

- a) *Caudal base*: descarga del acuífero a una corriente superficial. El volumen de descarga se puede determinar a partir de datos registrados en estaciones hidrométricas en los cauces de los ríos o mediante el análisis de hidrogramas en los que se puede diferenciar el caudal base.
- b) *Descarga por manantiales*: volumen de descarga a la superficie y puede dar origen a corrientes superficiales. Se determina a través de un hidrograma o mediante censos de aprovechamiento.
- c) *Descarga por evapotranspiración*: la descarga de un acuífero a la atmósfera puede tener lugar por evaporación directa de agua freática somera o por la transpiración de la flora. Esta descarga depende de varios factores climáticos, hidrogeológicos y fisiológicos (tipo y densidad de vegetación), que por su amplia variación en el espacio y tiempo no son controlables a la escala de un acuífero. Existen muchos métodos para estimar la evapotranspiración, pero la evapotranspiración del agua subterránea no puede obtenerse directamente (Wang et al., 2020). En casos en los que la evapotranspiración sea la principal descarga del acuífero se recomienda aplicar técnicas de percepción remota para estimar la evapotranspiración (DOF, 2015).
- d) *Flujo subterráneo*: consiste en aquellas salidas de agua subterránea mediante el flujo subterráneo a unidades hidrogeológicas adyacentes o acuíferos. Estas salidas se pueden determinar mediante la aplicación de la Ley de Darcy, en la definición de secciones de salida a partir de la configuración de los niveles de agua subterránea.

Capítulo 3. Marco teórico

- e) *Extracción de agua subterránea*: corresponde a la descarga de agua subterránea por medio de captaciones y se determina a partir de lecturas registradas en los medidores instalados en pozos.

3.3. Modelo conceptual de recarga

La conceptualización del proceso de recarga en un marco geológico es compleja, debido a que se requiere la identificación y cuantificación de múltiples parámetros que controlan la recarga, así como identificar posibles zonas de recarga (Castillo et al., 2021). El desarrollo de un modelo conceptual de recarga es un paso fundamental en cualquier estudio de recarga y debe elaborarse en su fase inicial (figura 3.1), ya que puede revisarse y ajustarse a los datos y análisis que proporcionan nuevas percepciones al sistema hidrológico (Healy, 2010).

La identificación de los parámetros que influyen en la recarga tiene un impacto directo en la toma de decisiones y planificación de recursos (Mengistu et al., 2021), así como la selección de un métodos para la estimación de la recarga.

De acuerdo con Healy (2010), entre los factores que influyen en el modelo conceptual de recarga se encuentran:

3.3.1. Variabilidad espacial y temporal de la recarga.

La recarga varía temporalmente, ya que las tendencias climáticas estacionales, plurianuales o incluso a largo plazo afectan a los patrones de recarga. Asimismo, las propiedades del suelo y del acuífero cambian espacialmente, generando grandes cambios en las tasas de recarga a lo largo del tiempo y el espacio. La importancia de la variabilidad espacial y temporal de la recarga debe considerarse en el contexto de los objetivos del estudio.

El impacto de estos factores en la recarga de las aguas subterráneas es importante para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación; por lo tanto, los métodos que proporcionan estimaciones puntuales de la recarga pueden ser apropiados para este tipo de enfoques.

Dicho lo anterior, a continuación, se analizan los factores que afectan la variabilidad de las tasas de recarga (Healy, 2010):

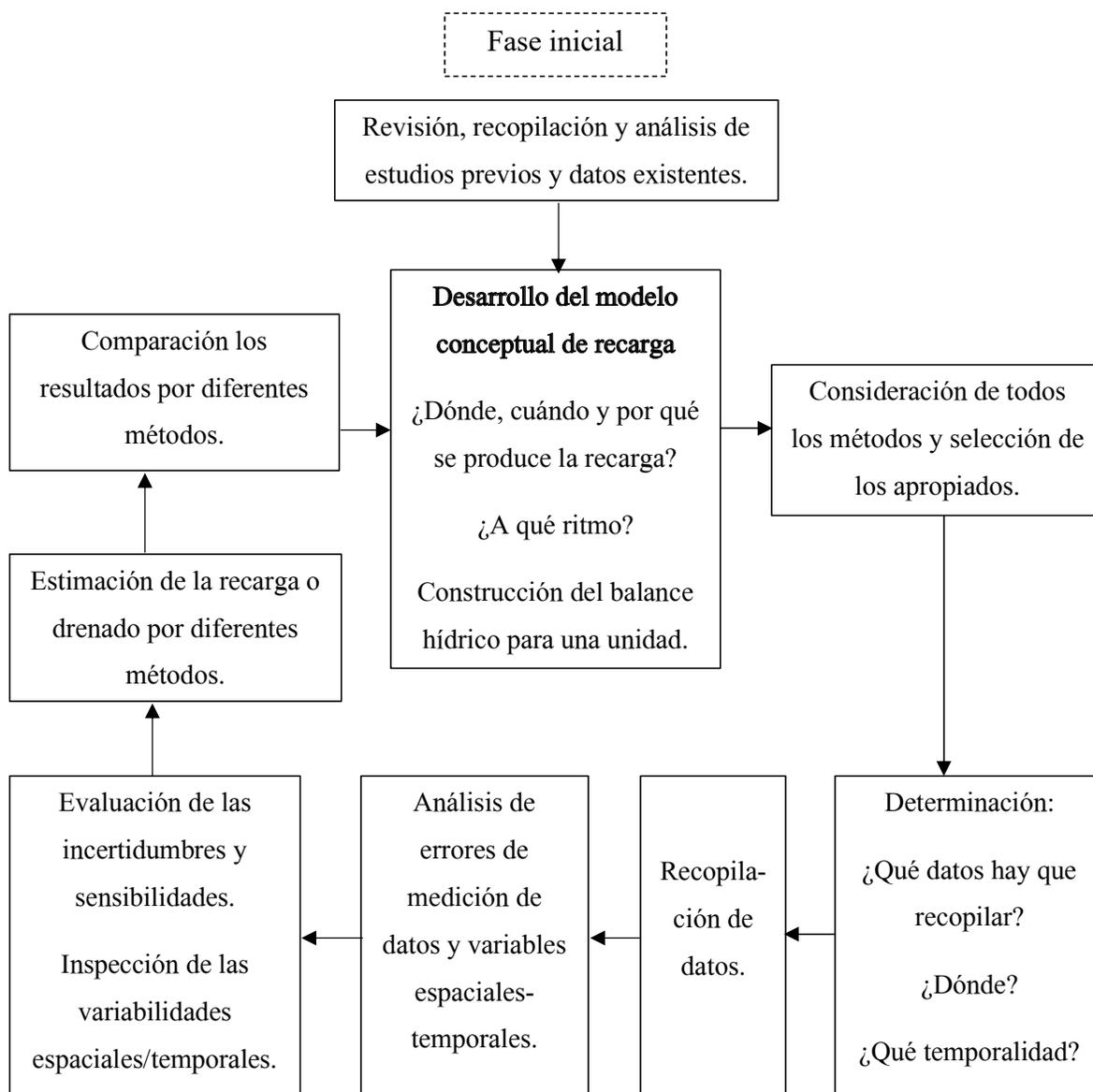


Figura 3.1. Esquema del proceso para desarrollar un modelo conceptual de recarga (Healy, 2010).

3.3.2. Clima

La variabilidad climática suele ser el factor más importante que afecta a la variabilidad de las tasas de recarga. Las precipitaciones, fuente de recarga natural, son el componente dominante en el balance hídrico de la mayoría de las cuencas. Las tendencias estacionales, anuales y a largo plazo de las precipitaciones, así como la frecuencia, la duración y la intensidad de los distintos episodios de precipitación también afectan a los procesos de recarga. Las condiciones son más favorables para el descenso del agua a través de la zona no saturada hasta el nivel freático cuando las tasas de precipitación superan las tasas de evapotranspiración.

3.3.3. Suelo y geología

De acuerdo con Balek (1988), el suelo es un factor muy decisivo en el proceso de recarga, sus propiedades físicas (textura, estructura y espesor) pueden convertirse en el primer factor decisivo en la infiltración. Es más probable que la recarga ocurra en zonas que tienen suelos de grano grueso y con una permeabilidad relativamente alta, ya que son capaces de transmitir el agua rápidamente y facilitan la recarga. En contraposición, los suelos de grano fino son menos permeables y son capaces de almacenar mayores cantidades de agua. Por lo tanto, en las zonas de sedimentos de grano más fino se esperaría una disminución de la infiltración y un aumento de la escorrentía superficial (Healy, 2010).

La geología del subsuelo influye en los procesos de descarga, así como en los procesos de recarga. Si la tasa de descarga de un acuífero es inferior a la tasa de recarga, aumenta el almacenamiento de agua dentro del acuífero. El almacenamiento del acuífero puede llegar a un máximo en el que no se puede aceptar una recarga adicional, independientemente de la cantidad de precipitación. Esta condición conduce típicamente a un aumento de la escorrentía.

3.3.4. Topografía

La topografía de la superficie terrestre juega un papel importante en los procesos de recarga, las pendientes pronunciadas tienen bajas tasas de infiltración y altas tasas de escorrentía. Por su parte, las superficies planas tienen un drenaje superficial deficiente y son propicias para la recarga difusa. Las pequeñas depresiones a menudo pueden tener una profunda influencia

en las tasas de infiltración. El relieve local, la orientación y la altitud de las cadenas montañosas son factores topográficos adicionales que pueden afectar los procesos de recarga.

3.3.5. Hidrología

En un modelo conceptual de recarga los procesos de recarga deben tener en cuenta si los sistemas de flujo de aguas superficiales y subterráneas están vinculados, si las corrientes superficiales son perennes o efímeras, así como si los arroyos están ganando (recibiendo la descarga de aguas subterráneas) o perdiendo (proporcionando recarga).

Otro aspecto importante para considerar es la profundidad del nivel freático, la recarga puede ser en gran medida episódica, y se produce en respuesta a cualquier acontecimiento de precipitación de gran magnitud. Sin embargo, un nivel freático muy profundo tiene menos posibilidades de recibir episodios de recarga y se esperaría que esta ocurra de manera estacional.

3.3.6. Vegetación y uso del suelo

La vegetación y el uso del suelo pueden tener profundos efectos en los procesos de recarga, los tipos y densidades de vegetación influyen en los patrones de evapotranspiración. Una superficie de tierra con vegetación suele tener una tasa de evapotranspiración más alta (y, por lo tanto, menos agua susceptible para la recarga) que una superficie de tierra sin vegetación en condiciones similares. La profundidad a la que se extienden las raíces de las plantas influye en la eficiencia con la que las plantas pueden extraer agua de la subsuperficie. En la zona de raíces se produce un importante intercambio de agua entre el suelo y el agua, mientras que por debajo de esta zona la infiltración es mínima (de Vries y Simmers, 2002).

La teledetección proporciona información sobre las características de la superficie, como el tipo de vegetación y el porcentaje de cobertura, el índice de superficie foliar y el uso del suelo, que puede ser útil para formular un modelo conceptual de recarga.

Por otra parte, la urbanización provoca muchos cambios en la superficie del suelo, y pueden tener importantes derivaciones para los procesos de recarga. Las carreteras, edificios y la zona urbana proporcionan zonas impermeables que pueden inhibir la recarga, así como los sistemas de suministro y tratamiento de agua son otros artefactos de la urbanización que pueden afectar a los procesos de recarga, tanto en lo que respecta al suministro de agua como

Capítulo 3. Marco teórico

a la posibilidad de contaminación. Estos sistemas consisten en canales abiertos o tuberías de agua y alcantarillas, en los que hay fugas asociadas con cualquier sistema de entrega, lo que puede propiciar que esa agua se infiltre y convertirse en recarga.

Finalmente, un modelo conceptual de los procesos de recarga se forma integrando los factores mencionados y tal vez otros factores, en hipótesis sobre dónde, cuándo y por qué se produce la recarga. Por ejemplo, el momento y el lugar de la recarga en los valles de las altas montañas suele estar controlado por la geología y la hidrología. Las nevadas en las montañas desde finales del otoño hasta principios de la primavera son la fuente de agua de recarga. El agua se almacena en el manto de nieve hasta finales de la primavera, cuando se libera a los arroyos a medida que el aumento de la temperatura del aire derrite los manojos de nieve. A medida que los arroyos fluyen hacia los valles, el agua se filtra hacia abajo, recargando los acuíferos subyacentes.

3.4. Los SIG como una herramienta en la estimación de la recarga

En los últimos años, se han producido importantes avances en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), convirtiéndolos en una valiosa herramienta para diversas áreas (Alfonso et al., 2019), incluidos los campos de la ingeniería, la geología y el medio ambiente. Su aplicación ha traído enfoques innovadores en la cuantificación de parámetros (Tleane y Ndambuki, 2020) así como la integración de mapas temáticos como la densidad de drenaje, litología, pendiente, cubierta vegetal, precipitación y geología (Alfonso et al., 2019).

En la actualidad, el software de SIG se emplea como una forma rápida, precisa y rentable para identificar factores relevantes en un modelo conceptual de recarga en un acuífero (Ahmed et al., 2021), además permite delimitar zonas de recarga y generar la cartografía de los recursos hídricos, lo cual resulta útil para satisfacer la creciente demanda y superar problemas relacionados con el suministro limitado de agua (da costa et al., 2019).

En un software de SIG existen dos modelos lógicos que contienen grandes cantidades de información espacial, y se conocen como formato ráster y vectorial. El formato ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, ejemplo: temperatura, precipitación, cobertura del suelo, pendiente etc.

Capítulo 3. Marco teórico

Un ráster puede ser una fotografía aérea digital, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados (Esri, 2020). En el formato vectorial los objetos se representan en puntos, líneas y polígonos, los cuales normalmente corresponden a: localidades, manantiales (punto), ríos, carreteras (líneas), cuerpos de agua, límites municipales (polígonos). Los objetos espaciales vectoriales tienen atributos, que consiste en texto o información numérica que los describe (Documentación QGIS, 2020).

Una de las herramientas que usualmente ofrece un software SIG es el álgebra de mapas, en el cual se pueden combinar capas en función de ecuaciones matemáticas, las herramientas del álgebra de mapas ofrecen usualmente los siguientes tipos de operaciones (Eastman, 2016):

- a. Operaciones para modificar matemáticamente los valores de los datos de atributo por medio de una constante.
- b. Operaciones para transformar matemáticamente los valores de los datos de atributo por medio de operaciones estándar (como funciones trigonométricas).
- c. Operaciones para combinar matemáticamente (sumar, restar, multiplicar y dividir) capas diferentes de datos para producir un resultado compuesto.

La escasez de datos fiables sobre las aguas subterráneas es el principal reto de muchos países en desarrollo. Por ello, se recomienda utilizar la tecnología SIG y RS (Sensores Remotos) para estimar una recarga fiable que se asemeje a los valores reales. Además, es necesario utilizar los conocimientos avanzados actuales de las técnicas de inteligencia artificial para aumentar la capacidad de predicción de la investigación de los recursos hídricos y las perspectivas de gestión sostenible (Mengistu et al., 2021). Ya que, el uso integrado de los SIG es una valiosa herramienta de vanguardia que permite a los responsables políticos, autoridades locales y planificadores la toma de decisiones rápidas en la gestión sostenible de los recursos hídricos (Alfonso et al., 2019).

3.5. Modelo operacional de Balance Energético Superficial Simplificado (SSEBop) para la estimación de la evapotranspiración real.

El modelo operacional de Balance Energético Superficial Simplificado (SSEBop) es aplicado en la generación de superficies de evapotranspiración real (ET_A), de acuerdo con Savoca et al., (2013), este modelo combina fracciones de ET generadas a partir de:

- 1) Imágenes térmicas MODIS de teledetección adquiridas cada 8 días.
- 2) ET de referencia utilizando un enfoque de índice térmico.

La característica única de la parametrización de SSEBop es que utiliza condiciones límite predefinidas, estacionalmente dinámicas que son únicas para cada píxel para los puntos de referencia “caliente/seco” y “frío/húmedo”. La formulación original del modelo se basa en los principios de píxeles calientes y fríos de los modelos SEBAL (algoritmo de balance energético de la superficie de la Tierra) el cual realiza estimaciones de ET de referencia como un residual del balance de energía utilizando imágenes de satélite que registren radiación visible, infrarroja cercana y térmica. Este método calcula las variables que componen el balance de energía a través de procesos aplicados a las imágenes de satélite, disminuyendo la necesidad de datos suministrada en estaciones meteorológicas.

SEBAL, calcula un flujo instantáneo de ET en el momento de la captura de la imagen, este flujo de ET es calculado para cada píxel de la imagen como un “residual” de la ecuación de balance de energía superficial (ecuación 3.4):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (3.4)$$

Dónde, λET es el flujo de calor latente (w/m^2), R_n es el flujo de radiación neta en la superficie (w/m^2), G es el flujo de calor del suelo (w/m^2) y H es el flujo de calor sensible del aire (w/m^2).

Por su parte, el balance energético de la superficie del SSEBop se resuelve primero para cada píxel de 1 km para una condición de cultivo de referencia (suponiendo una cobertura vegetal completa y un suministro de agua ilimitado) utilizando la ecuación estandarizada de Penman – Monteith.

Capítulo 3. Marco teórico

Actualmente el modelo SSEBop se utiliza para construir mapas mensuales de ET_A con una resolución de 1 km. Mediante la evaluación del rendimiento del modelo SSEBop se determinó que los resultados muestran una fuerte correlación lineal en diferentes tipos de cobertura del suelo a través de diversos ecosistemas, en la tabla 3.1 se muestran los coeficientes de correlación para las diferentes coberturas del suelo.

Tabla 3.1. Coeficientes de correlación del modelo SSEBop para las diferentes coberturas del suelo.

Cobertura del suelo	Coefficiente de correlación
Sabana boscosa	0.75
Pastizales	0.81
Bosques	0.82
Cultivos	0.84
Arbustos	0.89
Urbano	0.95

Fuente: Savoca et al., 2013.

Capítulo 4

Materiales y métodos

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, se desarrollaron las siguientes etapas metodológicas resumidas en la figura 4.1. Para llevar a cabo cada una de estas etapas es importante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ya que en ellos se puede visualizar, analizar y procesar la información del área de estudio.

La secuencia metodológica se explica detalladamente a continuación:

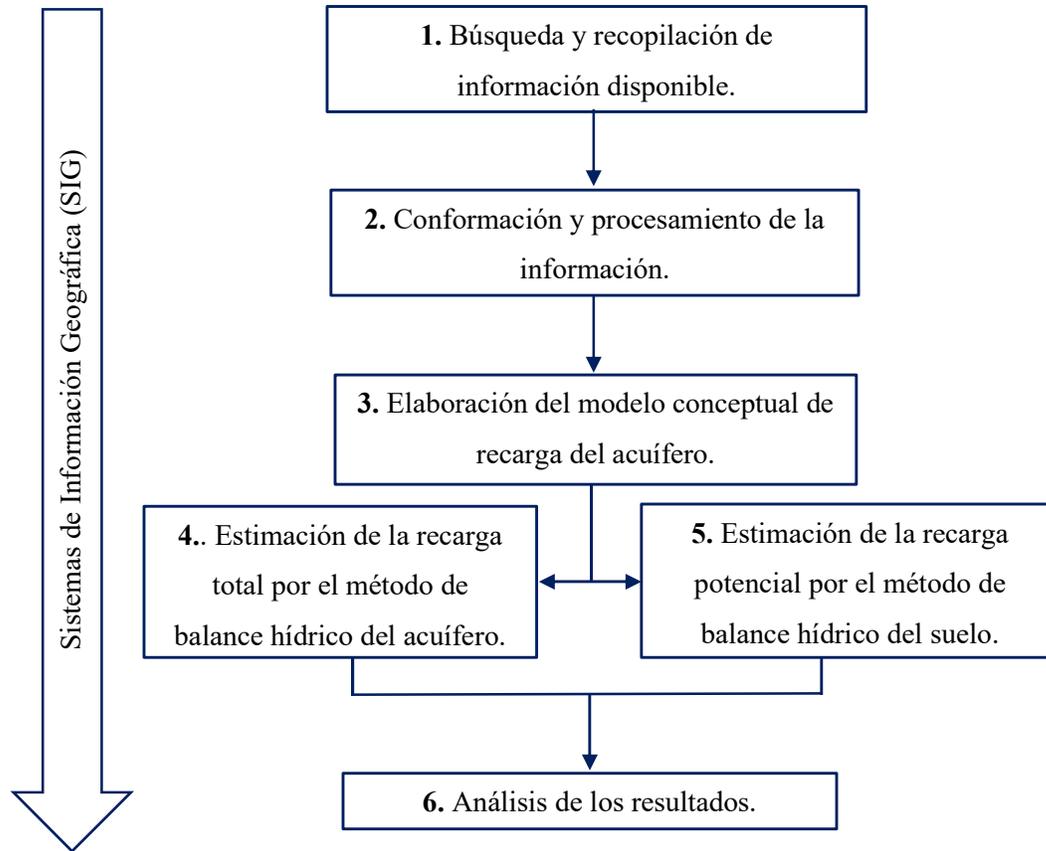


Figura 4.1. Esquema Metodológico para el desarrollo de esta investigación

4.1. Búsqueda y recopilación de la información disponible

Con el objetivo de comprender el funcionamiento del AT, la primera etapa consistió en la búsqueda y recopilación de información disponible, de carácter geológico, hidrogeológico, climatológico, uso del suelo y topografía. Además, se consultaron libros en materia de hidrología subterránea y superficial para acentuar las bases teóricas, también se consultaron publicaciones en revistas indexadas, así como tesis y estudios de carácter hidrogeológico, realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), organismos que se han involucrado en la Cuenca de México.

Capítulo 4. Materiales y métodos

Al mismo tiempo, se realizó la búsqueda de información cartográfica en fuentes públicas e institucionales como la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

4.2. Conformación y procesamiento de la información

Concluida la fase anterior, se realizó el procesamiento y análisis de la información recabada, la información recopilada en libros y artículos en materia de hidrología e hidrología subterránea fueron fundamentales en la conformación de las bases teóricas de esta investigación, por otra parte, la información del área de estudio fue el punto de partida para el entendimiento y caracterización del acuífero Texcoco. Durante el desarrollo de esta etapa metodológica fue imprescindible el uso del software de SIG, debido a la amplia gama de actividades que se realizaron en ellos, entre las que se pueden mencionar:

1. Conformación e integración de la información proveniente de distintas fuentes en un mismo sistema de referencia (UTM WGS-84 14N) y en algunos casos con las mismas características espaciales.
2. Ubicación y visualización de la información analizada con su base de datos asociada o una tabla de atributos, las cuales permitieron consultar y analizar los datos contenidos en las capas de información, así como clasificar o categorizar atributos para simbolizar una capa.
3. Manejo, procesamiento y combinación de distintas variables relacionadas con el funcionamiento del acuífero, mediante la aplicación de operaciones matemáticas básicas con datos espaciales, lo que permitió generar superficiales, por ejemplo, la red piezométrica del acuífero.
4. Y el más importante, el ensamble de todos los elementos recopilados para la comprensión del funcionamiento del acuífero en estudio.

De acuerdo con lo anterior, en la tabla 4.1 se indican los insumos que fueron requeridos para la cartografía del área de estudio y la elaboración del modelo conceptual de recarga, especificando la fuente, formato y resolución en la que se obtuvieron, así como el destino de la información recopilada.

Tabla 4.1. Insumos considerados en la presente investigación.

Insumos	Fuente	Formato	Sistema de Coordenadas	Resolución	Temporalidad	Producto
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Consultative Group on International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)	Geo TIFF	WGS 84	3” arcos de segundo	Edición 2018	Cartografía del área de estudio, delimitación del área productiva del acuífero.
Localidad, población	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)	Vectorial en punto, línea y polígono	WGS 84		Edición 2014	Cartografía de caracterización del área de estudio.
Límites administrativos de acuíferos	Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA)	Vectorial en línea y polígono	WGS 84		Edición 2018	Mapa de ubicación del área de estudio.
Hidrología	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)	Vectorial en punto, línea y polígono	WGS 84		Edición 2014	Mapa hidrológico

Tabla 4.1. Insumos considerados en la presente investigación (Continuación).

Insumos	Fuente	Formato	Sistema de Coordenadas	Resolución	Temporalidad	Producto
Geología	Servicio Geológico Mexicano (SGM)	Vectorial en línea y polígono	WGS 84		Edición 2014	Mapa geológico y mapa hidrogeológico.
	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM)					
Topografía	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)					
	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	Vectorial en líneas	WGS 84		Edición 2014	Delimitación del área de balance hídrico del acuífero
Evolución del nivel piezométrico	Organismo de Cuencas Aguas del Valle de México (OCAVAM)	Hoja de cálculo Excel			Datos anuales del año 1969 al 2018	Mapa de piezometría y evolución del nivel piezométrico.
	Instituto Nacional de Ecología (INE)					
Uso del suelo	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)	Vectorial en polígonos	WGS 84		Serie V: 2016	Estimación del balance hídrico del suelo.
	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)					
Edafología	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM)	Vectorial en polígonos	WGS 84		Edición 2013	Estimación del balance hídrico del suelo.

Tabla 4.1. Insumos considerados en la presente investigación (Continuación).

Insumos	Fuente	Formato	Sistema de Coordenadas	Resolución	Temporalidad	Producto
Precipitación	Daymet: Resúmenes climáticos mensuales en una cuadrícula de 1 km para América del Norte, versión 4.	Ráster	WGS 84	(~1 km) Ráster	Periodo 1980 – 2018	Caracterización del área de estudio. Estimación del balance hídrico del suelo.
Evapotranspiración	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).	Ráster	WGS 84	1 km Ráster	Periodo 2003 - 2018	Estimación del balance hídrico del suelo.
Pozos de extracción	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Registro Público de Derechos de Agua (REPDA)	Hoja de cálculo Excel. Vectorial en puntos	WGS 84		CENSO 2006 REPDA 2019	Caracterización del área de estudio. Balance hídrico del acuífero.
Manantiales	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	Hoja de cálculo Excel. Vectorial en puntos	WGS 84		CENSO 2006 REPDA 2019	Caracterización del área de estudio. Balance hídrico del acuífero.

4.3. Elaboración del modelo conceptual de recarga del acuífero

De acuerdo con Healy (2010), la elaboración el modelo conceptual de recarga de un acuífero es muy importante en cualquier estudio de recarga y debe elaborarse al inicio, ya que puede revisarse y ajustarse con la información recopilada, además, permite un análisis que proporcione nuevas percepciones del sistema hidrológico, entre ellos la factibilidad de aplicación de métodos para estimar la recarga.

Para cumplir con los objetivos del modelo conceptual de recarga del acuífero se identificaron los procesos de entrada y descarga al sistema, así como las variables que influyen en el proceso, entre los que se encuentra: geología, hidrología superficial, hidrología subterránea y régimen de flujo de agua subterránea, para identificar de dónde proviene, cuando y como ocurre, todo esto permitió demostrar la aplicación de los métodos de balance hídrico.

El modelo se conformó a la luz del modelo matemático del acuífero Texcoco, elaborado por Suárez en el 2019, quien identificó las unidades hidroestratigráficas con base en las propiedades geológicas de los materiales que conforman el subsuelo de la región. El ensamble del modelo conceptual de recarga permitió el desarrollo de procesos previos a la aplicación de los métodos de balance hídrico los cuales se describen a continuación:

4.3.1. Definición del área de balance

Se definió un área de balance del acuífero (A), la cual contiene una mayor concentración de aprovechamientos de agua subterránea, así como pozos de observación con información. Esta área se definió en el software de SIG *ArcMap*, tomando en cuenta los criterios topográficos, geológicos e hidrogeológicos, así como la poligonal administrativa del acuífero, los pozos de observación con información y los pozos de extracción inscritos ante el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

La delimitación de esta área es muy importante, puesto que los límites administrativos no son equivalentes a los límites físicos del acuífero Texcoco y debido a que forma parte de la Cuenca de México no debe comprenderse de forma aislada, sino como parte de un sistema por lo que su comportamiento depende de lo que acontezca en los acuíferos colindantes.

4.3.2. Definición de la temporalidad del balance hídrico

La temporalidad del balance hídrico, tomo en cuenta los componentes de las ecuaciones de balance hídrico del suelo y del acuífero, para estimar la recarga potencial y la recarga total. La ecuación de balance hídrico del suelo requiere de información de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento por lo que la disponibilidad de estos insumos y su comportamiento temporal y espacial en el área de estudio repercutió en el establecimiento de la temporalidad del balance hídrico del suelo.

En cambio, la ecuación de balance hídrico del acuífero para estimar la recarga total requiere de información de entradas y descargas del acuífero, por lo que se realizó un análisis de la información piezométrica de la región, la cual fue proporcionada por el Organismo de Cuencas Aguas del Valle de México (OCAVAM). Se obtuvo la información de pozos de observación localizados en la Cuenca de México, el registro de datos de profundidad del nivel piezométrico en dichos pozos a partir del año 1969 y concluye en el año 2018.

Mediante una selección de pozos de observación con mayor cantidad de información, se procedió a realizar los gráficos de evolución del nivel piezométrico en el tiempo para tener una visión de la respuesta del acuífero ante los eventos de recarga y para comprender el comportamiento del nivel piezométrico del acuífero se procedió a elaborar la línea de tendencia.

Una línea de tendencia es una línea recta que se utiliza en un conjunto de datos lineales simples, en este caso fueron los registros de la profundidad del nivel piezométrico de cada pozo de observación. Las mediciones resultan lineales si la trama de puntos de datos se asemeja a una línea, la cual muestra que hay algo que aumenta o disminuye a un ritmo constante, tal y como se comportan los niveles en los pozos de observación del acuífero. La línea de tendencia es más confiable cuando su valor R^2 se encuentra o se aproxima a 1, cuanto mayor es el valor de R^2 indica que el modelo lineal explica la variabilidad de datos de respuesta en torno a su media (Microsoft, 2020), y los valores de R^2 obtenidos para los pozos de observación de la región se encuentran cercanos a este valor.

Además, se tomó en cuenta la disponibilidad de información del volumen de descarga del acuífero, y de los parámetros hidráulicos como transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (Sy) de las unidades hidroestratigráficas.

4.3.3. Identificación de las unidades hidroestratigráficas

La identificación de las unidades hidroestratigráficas del acuífero se basó en la geología publicada en el año 2014 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en la determinación de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México, debido a que la escala de representación no desprecia las variaciones entre los materiales geológicos presentes en la región.

Así mismo, los cortes geológicos seleccionados para la complementación del modelo geológico de la región fueron realizados por Suárez en el año 2019. La información para elaborar dichos cortes la obtuvo de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, quienes en 1969 realizaron perforaciones y sondeos geofísicos variables entre 60 y 2 065 m con el fin de conocer la estratigrafía e investigar la hidrología subterránea del Ex Lago de Texcoco.

El objetivo de identificar las unidades hidroestratigráficas en el modelo conceptual de recarga es para conocer las zonas de recarga o descarga, el basamento del acuífero, así como las características y parámetros hidráulicos del acuífero en explotación.

4.3.4. Definición del régimen de flujo de agua subterránea

En relación con el régimen de flujo de agua subterránea, este se definió con datos piezométricos del año 2018. De los 103 pozos de observación que se encuentran en el área de estudio, se seleccionaron 34 para la configuración del nivel piezométrico. Como resultado se obtuvo la configuración de las isolíneas de nivel y la dirección del flujo de agua subterránea.

Para obtener la elevación del nivel piezométrico se restó la profundidad del nivel registrada en el año 2018 a la elevación en msnm a la que se encuentra el pozo de observación, como se expresa en la ecuación 4.1:

$$ENP = Elev\ Pozo - Prof\ nivel \quad (4.1)$$

Dónde, *ENP*, es la elevación del nivel piezométrico del año establecido, *Elev Pozo*, es la elevación en msnm a la que se encuentra el pozo de observación y *Prof nivel*, es el valor registrado de profundidad del nivel piezométrico registrado en el año seleccionado.

Capítulo 4. Materiales y métodos

Una vez obtenida la elevación del nivel piezométrico del año 2018, en el software de SIG se localizaron los pozos dentro de la poligonal del acuífero, junto con el ID para realizar el trazado de isolíneas, uniendo puntos de igual valor.

El trazado de isolíneas se realizó de forma manual mediante el siguiente procedimiento:

1. Unión mediante una línea los puntos de mayor (punto B) y menor (punto A) valor.
2. Utilizando una regla para medir la distancia entre dichos puntos.
3. Se escogió un valor del parámetro que se encuentre entre los dos anteriores; por comodidad se tomará el valor del tercer punto (C).
4. Se situó dicho valor sobre la línea AB, en la posición que le corresponda (figura 4.2). Para ello se utilizará la siguiente igualdad (ecuación 4.2, 4.3 y 4.4):

$$\frac{\text{Distancia entre el punto de valor superior y el punto seleccionado}}{\text{Distancia entre puntos de valor superior e inferior}} = \quad (4.2)$$

$$\frac{\text{Valor del punto superior} - \text{valor del punto seleccionado}}{\text{Valor del punto superior} - \text{valor del punto inferior}} =$$

Según la figura 4.2, se tiene:

$$\frac{\text{Longitud de la línea } BD}{\text{Longitud de la línea } BA} = \frac{\text{Valor en } B - \text{valor en } D}{\text{Valor en } B - \text{valor en } A} \quad (4.3)$$

Se sustituyen por los valores correspondientes

$$\frac{\text{Longitud de la línea } BD}{30 \text{ unidades}} = \frac{52 - 50}{52 - 49}$$

$$\frac{\text{Longitud de la línea } BD}{30 \text{ unidades}} = \frac{2}{3} \quad (4.4)$$

$$\text{Longitud de la línea } BD = \frac{60 \text{ unidades}}{3} = 20 \text{ unidades}$$

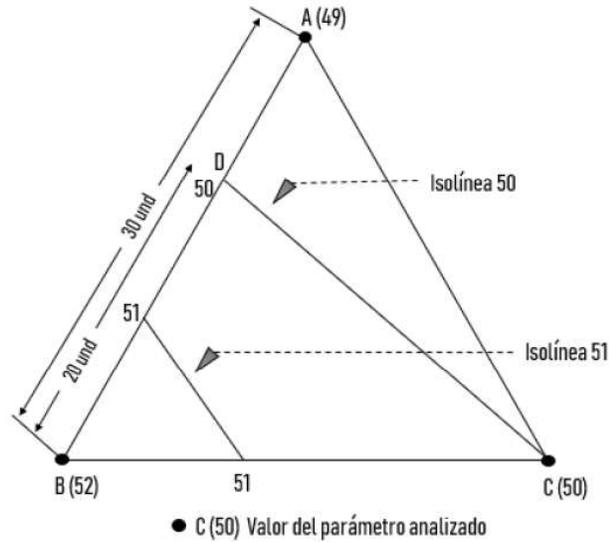


Figura 4.2. Ejemplo del trazado de isótopos por el método de triangulación.

5. Una vez colocado el punto D en su posición se puede trazar la isótopo uniendo D con C.
6. Repitiendo el proceso en el lado BC del triángulo se obtiene la isótopo de valor 51.

El trazado de isótopos se realizó con apoyo de la superficie topográfica de la región y la distribución de pozos de extracción. Una vez realizado el trazado de isótopos, se dedujeron los flujos de agua subterránea en la región y finalmente se digitalizaron las isótopos en el software de SIG ArcMap para integrarlas al modelo conceptual de recarga.

4.3.5. Identificación de las descargas del acuífero

De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015, la descarga de un acuífero puede ocurrir de forma natural a través de manantiales, caudal base, flujos subterráneos y evapotranspiración, de forma artificial mediante pozos de bombeo. Se consultó el volumen de descarga en censos realizados por la CONAGUA, así como el volumen de descarga de usuarios registrados ante del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA). Una vez obtenidos los insumos previamente mencionados, se compilaron en el modelo conceptual de recarga del acuífero.

4.4. Estimación de la recarga total por el método del balance hídrico del acuífero

Una vez que se elaboró el modelo conceptual de recarga del acuífero y se conocieron los mecanismos de entrada y salida del acuífero, se desarrollaron las siguientes etapas para estimar la recarga total por el método del balance hídrico del acuífero para el periodo establecido. De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015, la recarga total que recibe un acuífero en un tiempo dado se determina por medio del balance del acuífero, representado en la ecuación general 4.5.

$$R_t = D_t \pm \Delta S \quad (4.5)$$

Dónde, R_t es la recarga total, D_t es la descarga total, que equivale a la suma total de todas las salidas en el acuífero y ΔS es el cambio de almacenamiento del acuífero. De acuerdo con la ecuación 4.5, las entradas y salidas de un acuífero están presentadas en la ecuación 4.6.

$$Eh + Rv + Ri - Sh - B = \pm \Delta S \quad (4.6)$$

Dónde las entradas están conformadas por la recarga natural, la cual puede ocurrir por dos vías, mediante la recarga vertical (Rv) y mediante flujos subterráneos (Eh) y de forma artificial a través de la recarga inducida (Ri). Las salidas están conformadas por las descargas naturales mediante flujo subterráneo (Sh) y artificiales a través de pozos de bombeo (B). ΔS es el cambio de almacenamiento del acuífero el cual se determina a partir de la evolución de los niveles de agua subterránea y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero (Sy).

Uno de los componentes con mayor incertidumbre en su cálculo es la recarga vertical y debido a que se contó con información para calcular el cambio de almacenamiento, así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor fue despejado de la ecuación de balance 4.6, dicho lo anterior la recarga vertical se calculó mediante la ecuación 4.7.

$$Rv = B + Sh - Ri - Eh \pm \Delta S \quad (4.7)$$

Dónde, Rv es la recarga vertical, B es el volumen de bombeo, Sh son las salidas por flujo subterráneo, Ri es la recarga inducida, Eh son las entradas por flujo subterráneo y ΔS es el cambio de almacenamiento del acuífero.

Una vez que se calculó la recarga vertical fue posible conocer las entradas al acuífero, mediante la ecuación 4.8 se obtuvo la recarga total del acuífero.

$$Rt = Ri + Eh + Rv \quad (4.8)$$

Dónde Rt es la recarga total, Ri la recarga inducida, Eh son las entradas por flujo subterráneo, y Rv es la recarga vertical.

4.4.1. Cálculo de la recarga inducida del acuífero

La recarga inducida ocurre principalmente en sistemas de riego y en las fugas de redes de abastecimiento y alcantarillado, la cual se puede infiltrar y alcanzar el acuífero, pero debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, el volumen de recarga inducida se consideró el establecido por la CONAGUA en el informe de disponibilidad de Agua en el acuífero Texcoco, del año 2014. Este fue calculado considerando un volumen destinado al uso agrícola para obtener el volumen de infiltración por retornos de riego y el de uso público urbano para obtener el volumen de infiltración por fugas en redes de agua potable y alcantarillado para los cuales se les consideró un coeficiente de infiltración del 2% para el subsuelo, el cual está constituido principalmente por las arcillas que conforman el acuitardo.

4.4.2. Cálculo de las entradas y salidas del acuífero por flujo subterráneo

El cálculo de entradas y salidas por flujo subterráneo se obtuvo con base en la Ley de Darcy, la cual establece que el caudal que atraviesa una sección (celda) es igual al producto de la transmisividad del material geológico por la longitud del área transversal al flujo considerada y multiplicada por el gradiente hidráulico (ecuación 4.9). La recarga y descarga por flujo subterráneo del acuífero es la suma de todos los caudales de cada una de las celdas establecidas a partir de la elevación del nivel piezométrico de un año establecido.

$$Q = T * B * i \quad (4.9)$$

Dónde Q es igual al caudal (m³/día), T es la transmisividad del material geológico (m²/día), B, es la longitud de la celda (m) e i es el gradiente hidráulico (adimensional).

El trazado de las celdas se realizó con apoyo de la topografía, geología, distribución de los pozos de extracción y observación, así como la dirección del flujo subterráneo en el acuífero. Una vez trazadas las celdas, en el software de SIG ArcMap se midió la longitud (B) y el ancho (a), y conocida la elevación de las isolíneas de nivel se calculó la altura (h) entre las mismas, y con estos insumos se obtuvo el gradiente hidráulico de cada celda (i) (ecuación 4.10) (figura 4.3).

$$i = \frac{h1 - h2}{a} \quad (4.10)$$

Dónde, i es el gradiente hidráulico, h es la diferencia entre las isolíneas de nivel piezométrico (msnm) y a es el ancho de la celda (m).

Posteriormente, se realizó la asignación de valores de transmisividad (T), los cuales se obtuvieron de valores representativos de las unidades hidroestratigráficas del acuífero (tabla 4.2) transformando las unidades de m²/s a m²/día y finalmente aplicando la ecuación 4.9 se calcularon las entradas y salidas por flujo subterráneo.

Tabla 4.2. Valores de transmisividad para las unidades hidroestratigráficas.

Unidad Hidroestratigráfica	Transmisividad (m ² /s)	Transmisividad (m ² /día)
UH-1	0.0003	25.92
	0.0005	43.2
UH-2	0.001	86.4
	0.0015	129.6
UH-5	0.002	172.8
UH-6	0.0015	129.6
	0.003	259.2

Fuente: CONAGUA, 2014

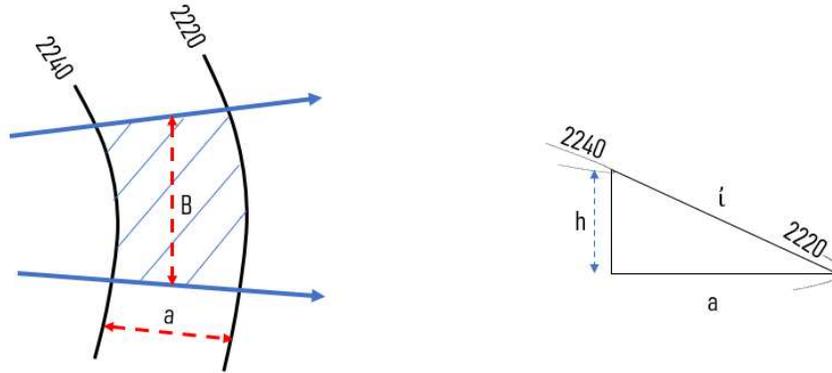


Figura 4.3. Ejemplo de celda de entrada por flujo subterráneo y sus parámetros en la ecuación.

4.4.3. Cálculo del cambio de almacenamiento del acuífero

La obtención del cambio del almacenamiento del acuífero se realizó mediante el trazado de isolíneas de evolución piezométrica, para ello se contó con información del nivel piezométrico registrado en los pozos de observación localizados en el área de balance establecida, con la información piezométrica se obtuvo el abatimiento promedio del nivel del agua subterránea (Abp) de la temporalidad establecida mediante la ecuación 4.11.

$$\text{Evolución del nivel} = Ni - Nf \quad (4.11)$$

Dónde, Ni , corresponde a la profundidad del nivel del año inicial y Nf es la profundidad del nivel del año final del periodo en análisis.

Posteriormente, se trazaron las isolíneas de evolución piezométrica mediante el método del trazado de isolíneas explicado en el apartado 4.3.4 y con apoyo de las unidades hidroestratigráficas establecidas en el modelo conceptual de recarga. Después, las isolíneas de evolución piezométrica fueron digitalizadas en software de SIG en forma de polígonos para obtener el área en m^2 .

En cuanto a la evolución piezométrica, debido a que los niveles descienden se obtuvo un volumen de roca drenada Vrd , y se expresa mediante la ecuación 4.12.

$$Vrd = A * Abp \quad (4.12)$$

Dónde, Vrd es el volumen de roca drenada por el descenso del nivel piezométrico (m^3), A es el área del polígono de evolución piezométrica (m^2) y Abp es el abatimiento promedio del nivel piezométrico (m). Posteriormente se obtuvo volumen de roca drenada promedio mediante la ecuación 4.13.

$$Vrd \text{ anual} = Vrd/N \quad (4.13)$$

Dónde $Vrd \text{ anual}$ es el promedio de la evolución piezométrica, Vrd , es el volumen de roca drenada (m^3) y N , corresponde al número de años del periodo en análisis.

Con base en lo anterior, el cambio de almacenamiento (ΔS) de cada polígono de evolución fue determinado mediante la ecuación 4.14.

$$\Delta S = Vrd * Sy \quad (4.14)$$

Dónde, ΔS es el cambio de almacenamiento (m^3), Vrd es el volumen de roca drenada promedio (m^3) y Sy es el coeficiente de almacenamiento promedio de las unidades hidroestratigráficas (UH) en las cuales se encuentran los polígonos de evolución piezométrica y fueron definidas previamente en el modelo conceptual de recarga del acuífero.

4.4.4. Recarga vertical

Una vez obtenidas las variables de la ecuación de balance del acuífero, el cálculo de la recarga vertical se realizó mediante la aplicación de la ecuación 4.7.

4.4.5. Recarga total del acuífero

Finalmente, la recarga total del acuífero Texcoco para el periodo establecido se obtuvo de la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero como se expresa en la ecuación 4.8.

4.5. Estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo

La estimación de la recarga potencial del acuífero Texcoco se realizó mediante la aplicación de la ecuación del balance hídrico del suelo (ecuación 4.15).

$$I = P - R_0 - ET_A \quad (4.15)$$

Dónde, I , es la infiltración y será considerada como recarga potencial, P , es la precipitación, ET_A , es la evapotranspiración real, y R_0 , el escurrimiento superficial. Una vez conocida la ecuación del balance hídrico del suelo se obtuvo cada una de las variables para la temporalidad establecida.

4.5.1. Precipitación

Las superficies de precipitación se obtuvieron de Daymet, producto de investigación de la División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, TN. Daymet proporciona estimaciones cuadrículadas, continuas y a largo plazo de diferentes variables climatológicas, en una superficie cuadrículada de 1km x 1km sobre América del Norte, mediante la interpolación y extrapolación de observaciones terrestres mediante técnicas de modelado estadístico (Oak Ridge National Laboratory DAAC, 2021). En esta investigación se hizo uso de la versión *Daymet: resúmenes climatológicos mensuales en una cuadrícula de 1 km para América del Norte, versión 4*, la cual contiene información de precipitación del periodo 1980 – 2018.

Una vez obtenidas las 456 superficies mensuales de precipitación correspondientes al área de estudio, y a través del software de SIG TerrSet se crearon 12 grupos ráster correspondientes a los meses del año con las 38 superficies correspondientes y mediante el Modelador Macro de TerrSet se realizó el ensamble del modelo para obtener la precipitación media anual en el que los datos de entrada fueron los grupos ráster ya mencionados y mediante el operador matemático *add* se sumaron para obtener la precipitación acumulada mensual, posteriormente se dividieron entre el número de años del balance hídrico del suelo con el operador matemático *scalar* a través de la operación *divide* para calcular la precipitación media mensual (figura 4.4). Después, para obtener la precipitación media anual del acuífero se sumaron las 12 superficies de precipitación media mensual (figura 4.5) y se elaboró el gráfico de precipitación media anual en el área de estudio.

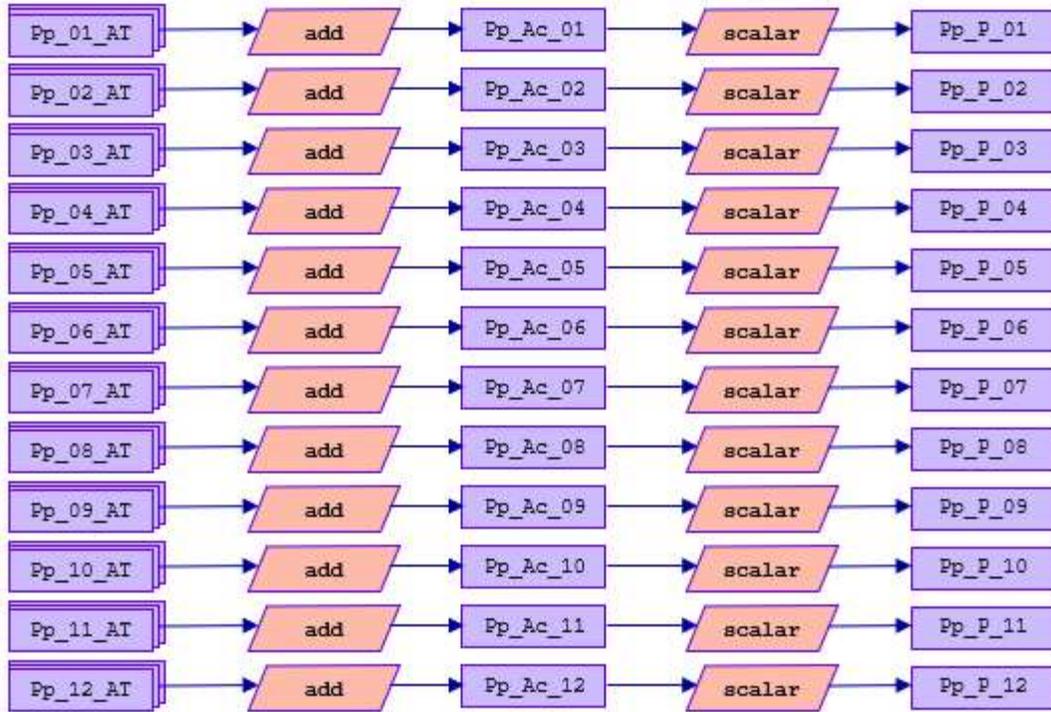


Figura 4.4. Esquema geomático del cálculo de la precipitación media mensual del área de estudio.

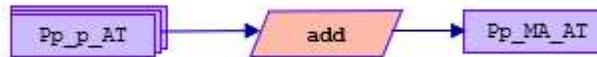


Figura 4.5. Esquema geomático del cálculo de la precipitación media anual del área de estudio.

4.5.2. Evapotranspiración real

Para el cálculo de la Evapotranspiración, se optó por utilizar las superficies de evapotranspiración real (ET_A) elaboradas por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) en conjunto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través de la aplicación web AppEEARS (aplicación para extraer y explorar muestras listas para análisis) la cual funciona de manera simple y eficiente en la solicitud de superficies de evapotranspiración real a partir del año 2003 hasta el presente.

Capítulo 4. Materiales y métodos

Una vez enviada y aprobada la solicitud de la información se descargaron 180 superficies mensuales de evapotranspiración real (ET_A) y en el software de SIG TerrSet se conformaron los grupos ráster de los meses correspondientes para posteriormente ensamblar el Macro Modelador como se realizó con la precipitación para obtener la evapotranspiración real media mensual (figura 4.6) y posteriormente la ET_A media anual del área de estudio (figura 4.7), así como un gráfico para visualizar su comportamiento mensual.

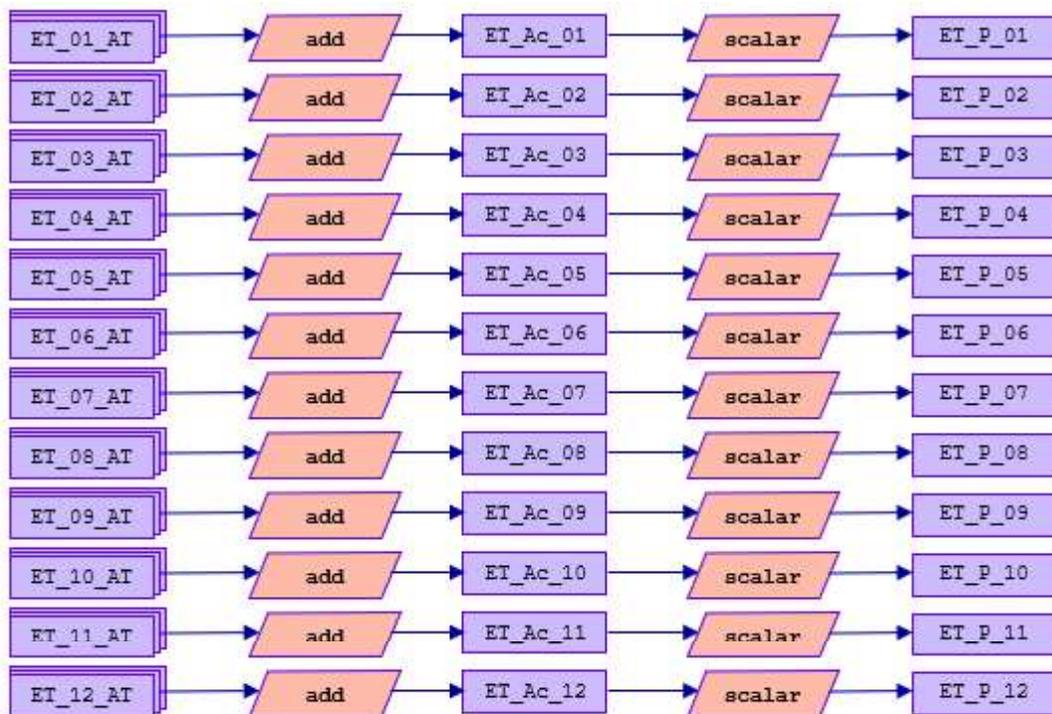


Figura 4.6. Esquema geomático del cálculo de la ET_A media mensual.

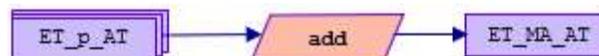


Figura 4.7. Esquema geomático del cálculo de la ET_A media anual.

4.5.4. Escurrimiento superficial

Para estimar el escurrimiento superficial en el área de estudio se empleó la ecuación 4.16:

$$Q = P * Ce \quad (4.16)$$

Dónde, Q es la altura de la lámina de escurrimiento anual en mm, P es la precipitación anual promedio en mm y Ce es el coeficiente de escurrimiento promedio, el cual es un parámetro adimensional.

De los métodos disponibles para calcular el coeficiente de escurrimiento (Ce) se optó por el método de Benítez et al., 1980. El cual depende de tres características:

- 1. Tipo de suelo (textura):** se clasifica en función de su textura (fina, mediana y gruesa), y se asocia a su grado de permeabilidad, como se muestra en la tabla 4.3.
- 2. Cobertura del suelo:** se clasifica en cinco categorías: 1) sin vegetación, 2) cultivo, 3) pastos y vegetación ligera, 4) hierba y 5) bosques y vegetación densa.
- 3. Pendiente del terreno:** la pendiente calculada en porcentaje se clasifica en cinco rangos que oscilan desde porcentajes de 0 % a mayores de 50%.

Dicho lo anterior, el coeficiente de escurrimiento (Ce) puede tomar valores entre 0.05 y 0.8, en la tabla 4.4 se muestran los valores del Ce en función de las características ya mencionadas. Sin embargo, en la búsqueda de un Ce que refleje las las características del área de estudio, así como lo establecido en el modelo conceptual de recargase optó por realizar una modificación al método.

Tabla 4.3. Clasificación de la permeabilidad del suelo establecida por Benítez.

Textura del suelo	Grado de permeabilidad
Fina	Impermeable
Mediana	Semipermeable
Gruesa	Permeable

Tabla 4.4. Valores del coeficiente de escorrentía, según Benítez.

Cobertura del suelo	Textura del suelo	Pendiente del terreno (%)				
		> 50	20 - 50	5 - 20	1 - 5	0 - 1
Sin vegetación	Impermeable	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6
	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Cultivos	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos y vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
Hierba	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques y vegetación densa	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Dicho lo anterior y de acuerdo con Chow et al., (1988), el coeficiente de escurrimiento en áreas urbanas, superficies cubiertas por asfalto y cemento o tejados, es mayor a 0.7, independientemente a la pendiente del terreno, con base en la metodología establecida por Benítez et al., (1980) el C_e disminuye en superficies con pendiente menor al 5%, aplicando este criterio en área de estudio donde la zona urbana se encuentra en la planicie ocasiona una contradicción a lo establecido en el modelo conceptual de recarga, es por ello que a toda superficie sin vegetación con textura de suelo impermeable se le asignó un C_e de 0.8.

Con base en lo anterior, para determinar el coeficiente de escurrimiento superficial (C_e) del área de estudio fue necesario obtener los siguientes insumos:

1. Tipo de suelo: se utilizó la información edafológica en formato vectorial del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2009), la cual muestra la distribución de los diferentes tipos de suelos en el área de estudio (figura 4.8). Es importante mencionar que esta información cuenta con una clasificación del suelo en función de su textura (gruesa, mediana y fina), sin embargo, una vez conocidos los suelos del área se consultó el manual de información edafológica de la FAO: Base referencial mundial del recurso suelo, un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional.

En dicho manual se ofrece una amplia información sobre las características y propiedades de los suelos, que permitió la complementación de la clasificación de la permeabilidad coherente con lo establecido modelo conceptual del acuífero. En la tabla 4.5 se muestran los suelos presentes en el área de estudio y la clasificación en función de la permeabilidad que se le asignó de acuerdo con la tabla 4.3.

Una vez realizada la clasificación en función de la permeabilidad, en el software de SIG ArcMap se le asignaron nuevos valores establecidos en la tabla 4.6.

Tabla 4.5. Suelos presentes en el área de estudio y su clasificación

Tipo de suelo	Clasificación en función de su permeabilidad
Andosol	Permeable
Arenosol	Permeable
Cambisol	Semipermeable
Durisol	Semipermeable
Phaeozem	Permeable
Regosol	Permeable
Solonchak	Impermeable
Umbrisol	Semipermeable
Vertisol	Semipermeable
Zona urbana	Impermeable

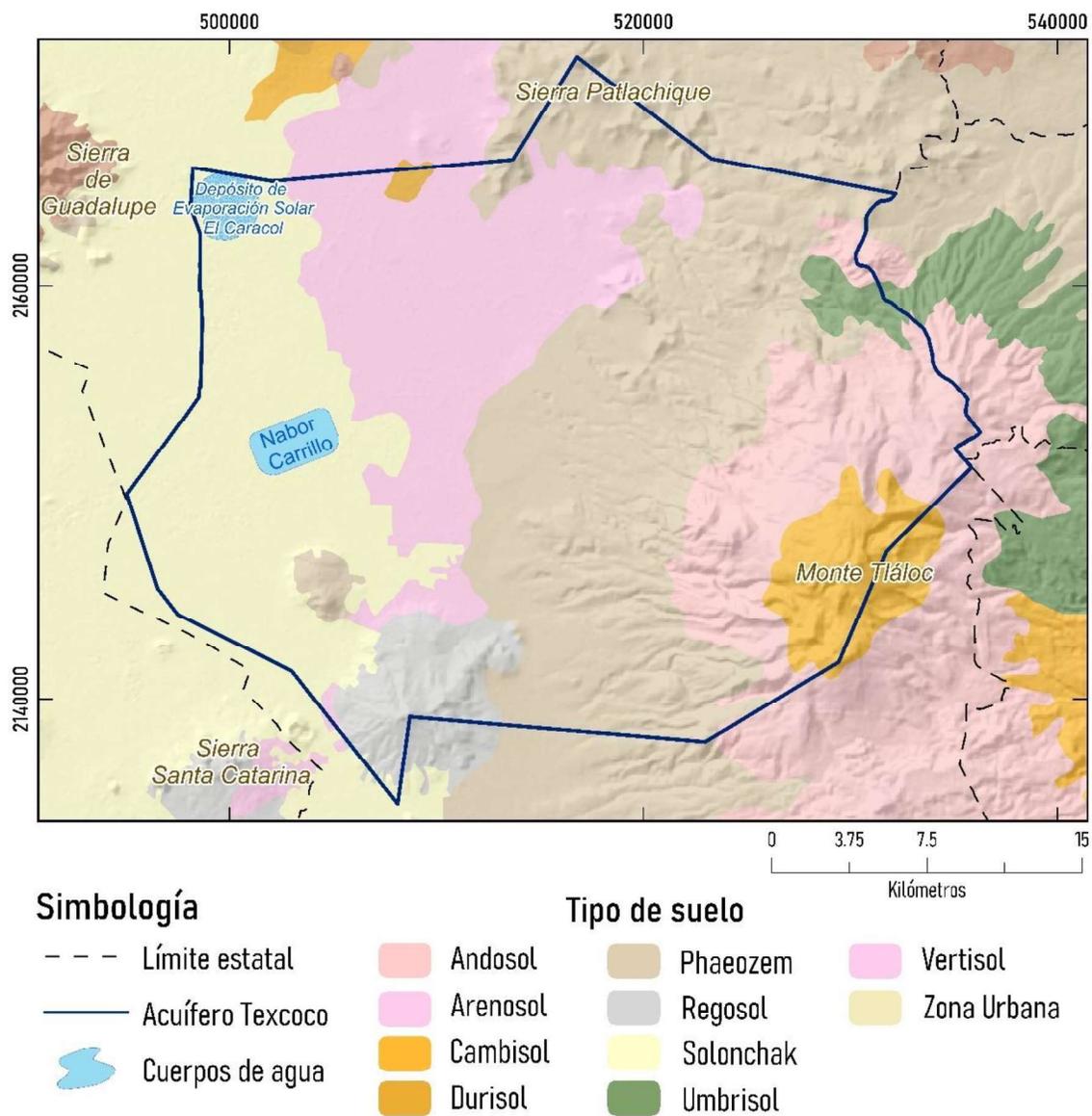


Figura 4.8. Distribución de los diferentes tipos de suelos en el área de estudio (INIFAP & CONABIO, 2008).

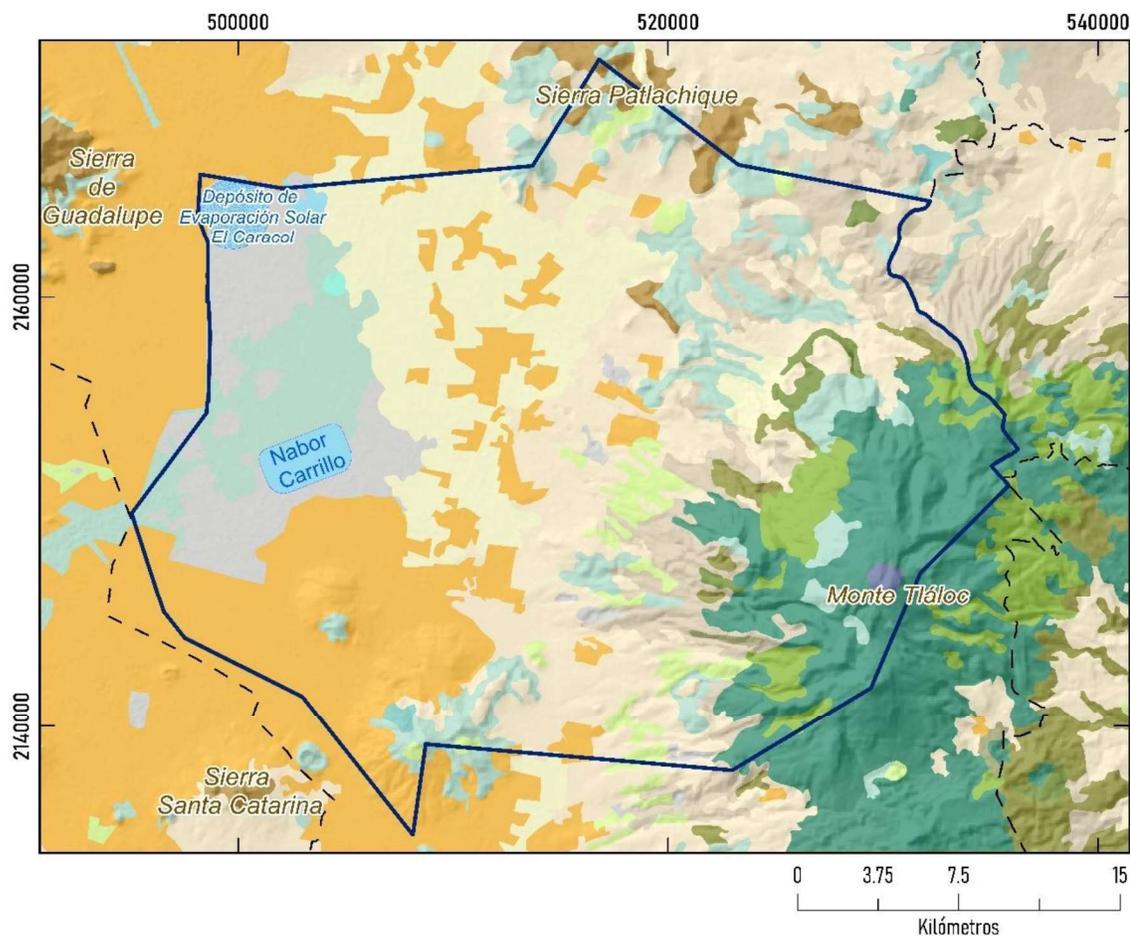
Tabla 4.6. Asignación de nuevos valores al grado de permeabilidad.

Grado de permeabilidad	Valor
Impermeable	10
Semipermeable	20
Permeable	30

2. Cobertura del suelo: se dispuso de la capa vectorial de información del uso de suelo y vegetación del año 2016, disponible en el geoportal de la CONABIO, siendo esta la más reciente hasta el momento de cobertura del suelo. La distribución de la cobertura del suelo en el área de estudio se muestra en la figura 4.9.

Debido a la variedad de usos y coberturas del suelo establecidas por la CONABIO se optó por sintetizar a las 5 coberturas establecidas por Benítez et al., 1980 como se muestra en la tabla 4.7. La reclasificación se realizó con apoyo de la imagen satelital del año 2016 disponible en Google Earth y posteriormente en el SIG a las nuevas coberturas del suelo se le asignaron valores entre 100 y 500 (tabla 4.8). Por su parte, Benítez no considera a la cobertura “Urbana” y para este caso fue clasificada en la categoría “Sin vegetación”.

3. Pendiente: para obtener este factor fue necesario contar con el modelo digital de elevación (figura 4.10) (MDE) el cual se obtuvo del Consultative Group on International Agricultural Research – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) a una resolución de 3 arcos de segundo y con una proyección geográfica de WGS-84 UTM 14. El MDE se introdujo al software de SIG TerrSet y mediante la herramienta *Slope* la cual ajusta a un plano los valores de z a un conjunto de celdas vecinas, el valor de la pendiente mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno. El ráster de pendiente de salida se puede calcular en unidades de porcentaje (elevación en porcentaje). El cual posteriormente se reclasificó y se le asignaron valores entre 1 y 5 en función del porcentaje de pendiente (tabla 4.9).



Simbología

- - - Límite estatal
- Acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Evaporador Solar "El Caracol"

Cobertura del suelo

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Agricultura de riego Agricultura de temporal Bosque de cultivado Bosque de encino Bosque de encino-pino Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque de pino-encino Bosque de táscate | <ul style="list-style-type: none"> Matorral Pastizal Pradera de alta montaña Sin vegetación Tular Urbano Vegetación hidrófila Vegetación secundaria |
|---|---|

Figura 4.9. Cobertura del suelo en el área de estudio (INEGI, 2016).

Tabla 4.7. Cobertura de suelo y su nueva clasificación de acuerdo con los criterios de Benítez et al., 1980.

Cobertura del suelo	Nueva clasificación
Agricultura de riego	Cultivos
Agricultura de temporal	Cultivos
Bosque de cultivado	Pastos y vegetación ligera
Bosque de encino	Bosque y vegetación densa
Bosque de encino-pino	Bosque y vegetación densa
Bosque de oyamel	Bosque y vegetación densa
Bosque de pino	Bosque y vegetación densa
Bosque de pino-encino	Bosque y vegetación densa
Bosque de táscate	Hierba
Matorral	Pastos y vegetación ligera
Pastizal	Hierba
Pradera de alta montaña	Hierba
Sin vegetación	Pastos y vegetación ligera
Tular	Hierba
Urbano	Sin vegetación
Vegetación hidrófila	Pastos y vegetación ligera
Vegetación secundaria	Pastos y vegetación ligera

Tabla 4.8. Asignación de nuevos valores a la cobertura del suelo.

Cobertura del suelo	Valor
Sin vegetación	100
Cultivos	200
Pastos y vegetación ligera	300
Hierba	400
Bosques y vegetación densa	500

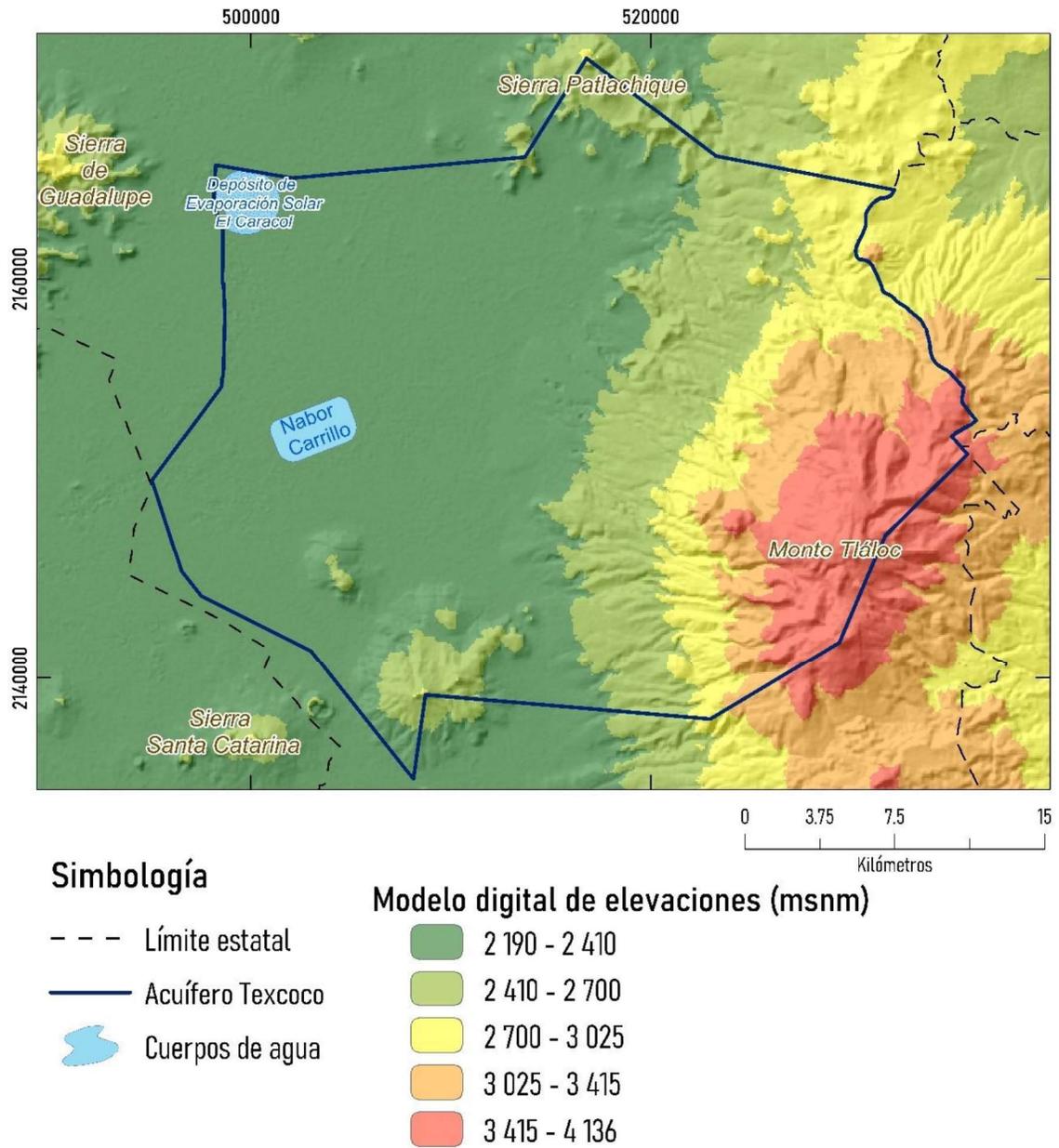


Figura 4.10. Modelo digital de elevaciones (MDE) del área de estudio (CGIAR-CSI, 2018).

Tabla 4.9. Asignación de nuevos valores a la pendiente.

Pendiente en %	Valor
> 50	1
20 – 50	2
5 – 20	3
1 – 5	4
0 – 1	5

Una vez que se obtuvieron los insumos para calcular el coeficiente de escurrimiento (C_e), en el software de SIG TerrSet se realizó el Macro Modelador en el que se sumaron las variables ya mencionadas y se obtuvo una imagen ráster con valores que oscilan entre 111 a 535, todo esto se realizó para poder asignarle los valores de C_e establecidos en la tabla 4.4. La asignación de valores se realizó con el módulo *Assing*, dónde se insertó la imagen ráster y un archivo.avl (attribute values file) con los valores de C_e a asignar (figura 4.11).

Dicho lo anterior, el C_e fue multiplicado por la precipitación media mensual para obtener el escurrimiento superficial mensual (figura 4.12) y posteriormente el escurrimiento superficial anual del área de estudio.

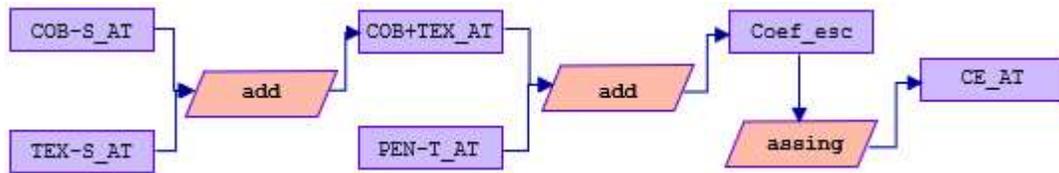


Figura 4.11. Esquema geomático del establecimiento del C_e del área de estudio.

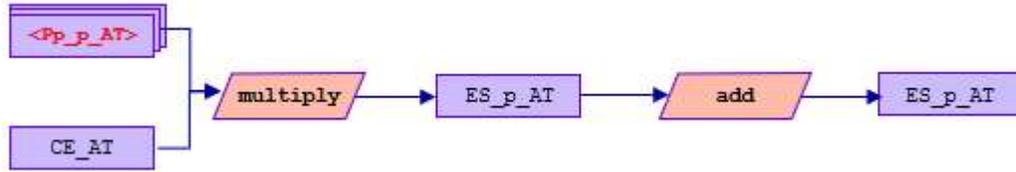


Figura 4.12. Esquema geomático del cálculo del escurrimiento superficial.

4.5.5. Infiltración

En cuanto a la infiltración, una vez que se obtuvieron las variables de la ecuación de balance hídrico del suelo se conformaron los 12 grupos ráster y se realizó el ensamble del Macro Modelador en TerrSet, en el que mediante el operador matemático *subtract* se restaron los insumos para finalmente obtener la infiltración del área de estudio (figura 4.13).

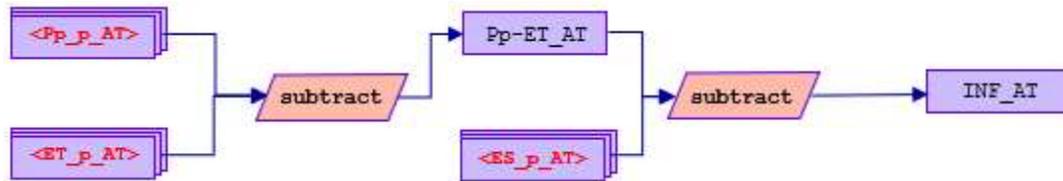


Figura 4.13. Esquema geomático del cálculo de la infiltración en el área de estudio.

Capítulo 5

Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de acuerdo con la secuencia metodológica planteada, los cuales permitieron estimar en el acuífero Texcoco la recarga total a través del método del balance hídrico del acuífero y la recarga potencial a través del método de balance hídrico del suelo para finalmente evaluarla con lo establecido en el modelo conceptual de recarga.

5.1. Búsqueda y recopilación de la información

La realización de esta etapa permitió comprender el funcionamiento del área de estudio, en sus componentes hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos y climáticos, los cuales fueron esenciales en la elaboración del modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco. Sin dejar a un lado la información de acuíferos adyacentes como el Zona Metropolitana de la Ciudad de México y Cuautitlán – Pachuca, con los que colinda hacia el oeste y el norte.

Además, como resultados de este proceso metodológico se realizó la cartografía de las características del área de estudio en el capítulo número 2 y con el apoyo de la bibliografía especializada se elaboró el marco teórico, el cual se encuentra en el capítulo número 3 de esta investigación.

5.2. Conformación y procesamiento de la información

Una vez recopilada la información, con apoyo del software de SIG, se homologaron los insumos al sistema de referencia UTM WGS 84, Zona 14 N, para poder visualizarlos de manera espacial y modificar las propiedades de las capas en la tabla de atributos. Esta herramienta resulto muy útil en la definición del área de balance, conocer superficies en km², aplicación de operaciones matemáticas, identificación de las unidades hidroestratigráficas, evolución del nivel piezométrico y establecimiento del régimen de flujo de agua subterránea.

La información recabada en tablas fue visualizada y procesada en Excel, debido a la facilidad en el manejo, aplicación de operaciones, realización de esquemas, gráficos y tablas para organizar la información, además de la facilidad para exportar información y procesarla en el software de SIG para combinarla con otros insumos recopilados.

5.3. Elaboración del modelo conceptual de recarga del acuífero

La culminación de las etapas anteriores con el apoyo del SIG dio paso al ensamble de los elementos que conforman el modelo conceptual de recarga del acuífero, entre los que se encuentran: la definición del área de balance, delimitación de la temporalidad para el balance hídrico, identificación de las unidades hidroestratigráficas, definición del régimen de flujo de agua subterránea y la definición de las salidas del acuífero.

5.3.1 Definición del área de balance

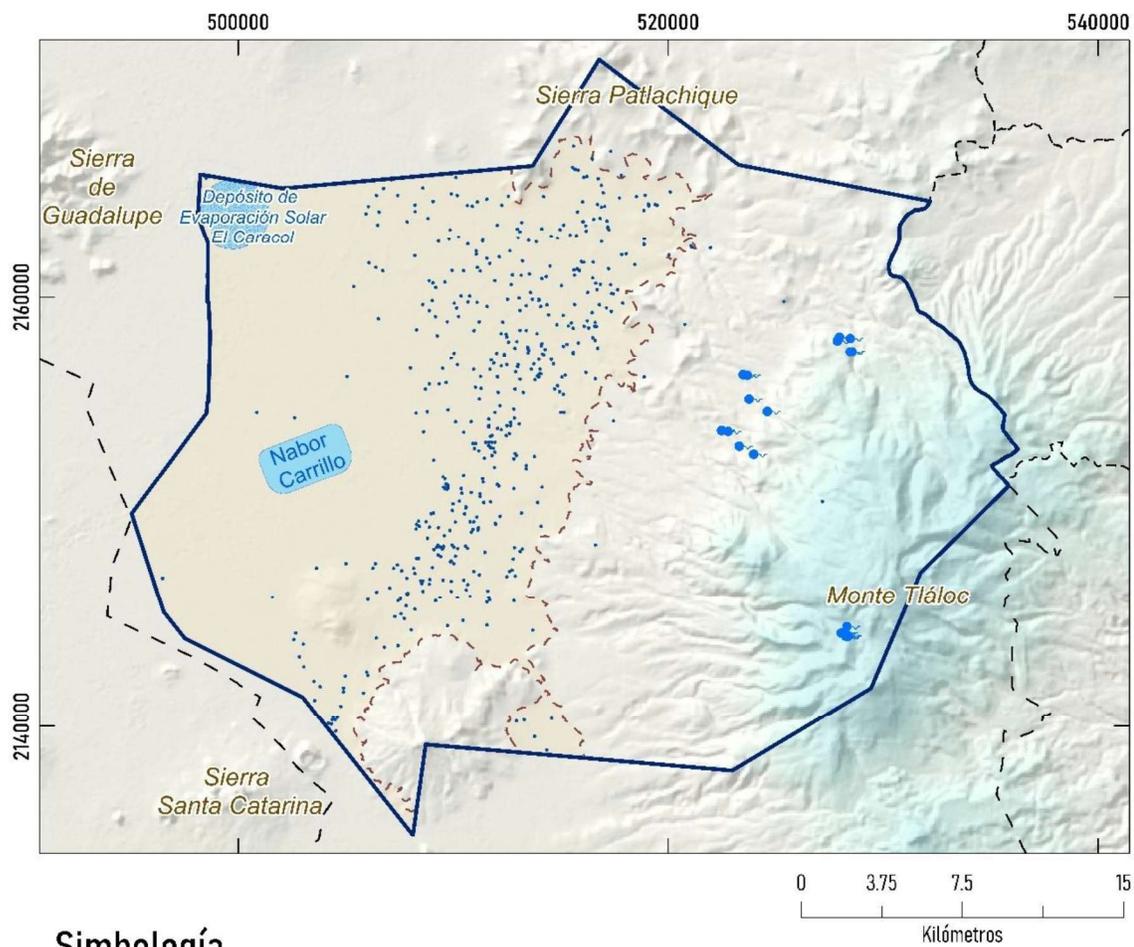
Para el método de balance del acuífero, se estableció un área considerando las cotas topográficas de 2 320 y 2 360 msnm debido a que, a partir de ellas se encuentra la mayor cantidad de aprovechamientos subterráneos, así como información en pozos de observación. La cota seleccionada delimita a la zona montañosa y la planicie del Ex Lago de Texcoco, dicho lo anterior, la superficie de balance comprende un área de 455 km² (figura 5.1).

La zona montañosa no fue considerada debido a la falta de pozos de observación y a la dispersión en los aprovechamientos subterráneos, sin embargo, en esta zona se encuentran los manantiales y debido a que se localizan fuera del área de balance establecida no se integraron al balance hídrico del acuífero para estimar la recarga total.

El AT forma parte de la Cuenca de México, sin embargo, no se consideró el límite físico el cual va más allá de los límites administrativos establecidos por la CONAGUA, ya que fue dividida en 3 subsistemas bajo el criterio de localización, geología y régimen del flujo subterráneo. Anteriormente se pensaba que el AT podría ser geológicamente independiente al resto del valle, aunque se tiene una conexión hidráulica con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica et al., 1992).

Además, el acuitardo tiene un espesor variable a lo largo de la Cuenca de México, disminuyendo hacia el norte en el acuífero Cuautitlán – Pachuca y al sur en el acuífero Chalco – Amecameca, por otro lado, en los límites con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México la ausencia de pozos de observación con información y aprovechamientos subterráneos dificulta la comprensión de esta zona, por lo que el área de balance establecida se considera apta para este método.

Por otro lado, para el balance hídrico del suelo se consideró el límite administrativo del acuífero (933.66 km²), ya que se contó con información de las variables para toda la superficie, esto representa una ventaja frente al balance hídrico del acuífero y facilita la complementación de los resultados.



Simbología

- | | | | |
|---|------------------|---|---------------------|
| - - - | Límite estatal |  | Área de balance |
| — | Acuífero Texcoco |  | Pozos de extracción |
|  | Cuerpos de agua |  | Manantial |

Figura 5.1. Área de balance delimitada para el acuífero Texcoco.

5.3.2. Definición de la temporalidad del balance hídrico

La temporalidad del balance hídrico del acuífero se estableció a partir del análisis de la información piezométrica de la Cuenca de México, es a partir de 1969 cuando inicia el registro en las mediciones del nivel piezométrico sin embargo son escasos los pozos que cuenta con información, es a partir de 1974 cuando se presentan registros en gran parte de los pozos, pero se observan periodos (1982 – 1984 y 1988 – 1990) en que ningún pozo presenta información, debido a esto, se realizó una selección de pozos con mayor cantidad de información piezométrica.

Posteriormente a la selección, se realizaron los gráficos del nivel piezométrico para comprender el comportamiento histórico del acuífero y se observó que la mayoría de los pozos presentan un descenso lineal por lo que no se observa alguna recuperación significativa (figura 5.2), esto también podría indicar que responden a una única unidad hidrogeológica en explotación.

Dicho lo anterior, el periodo de estimación de la recarga total comprende del año 2006 al 2018 (12 años en análisis), no se consideraron las décadas de 1980 y 1990 debido a que la mayoría de los pozos tiene registros incompletos y además se desconoce el volumen de extracción de dichos años que también es importante en este método.

Por otra parte, la temporalidad del balance hídrico del suelo se estableció a partir de la disponibilidad de los componentes de la ecuación de balance, siendo la precipitación uno de los insumos con mayor peso en la ecuación y se contó con información a partir del año 1980 hasta el 2018. En la figura 5.3 se observa el comportamiento de la precipitación en el acuífero Texcoco, la cual presenta oscilaciones a lo largo del tiempo, presentándose años en los que la precipitación ha superado los 700 mm, sin embargo, se observa que la precipitación siempre oscila entre los 500 y 600 mm al año. El gráfico muestra ciclos de las precipitaciones en los que tiende a disminuir y después a incrementarse, repitiendo este patrón de manera continua. Debido a que no se observan extensos periodos secos y húmedos en el acuífero Texcoco se decidió considerar los 39 años (1980 – 2018) para la temporalidad del balance hídrico del suelo.

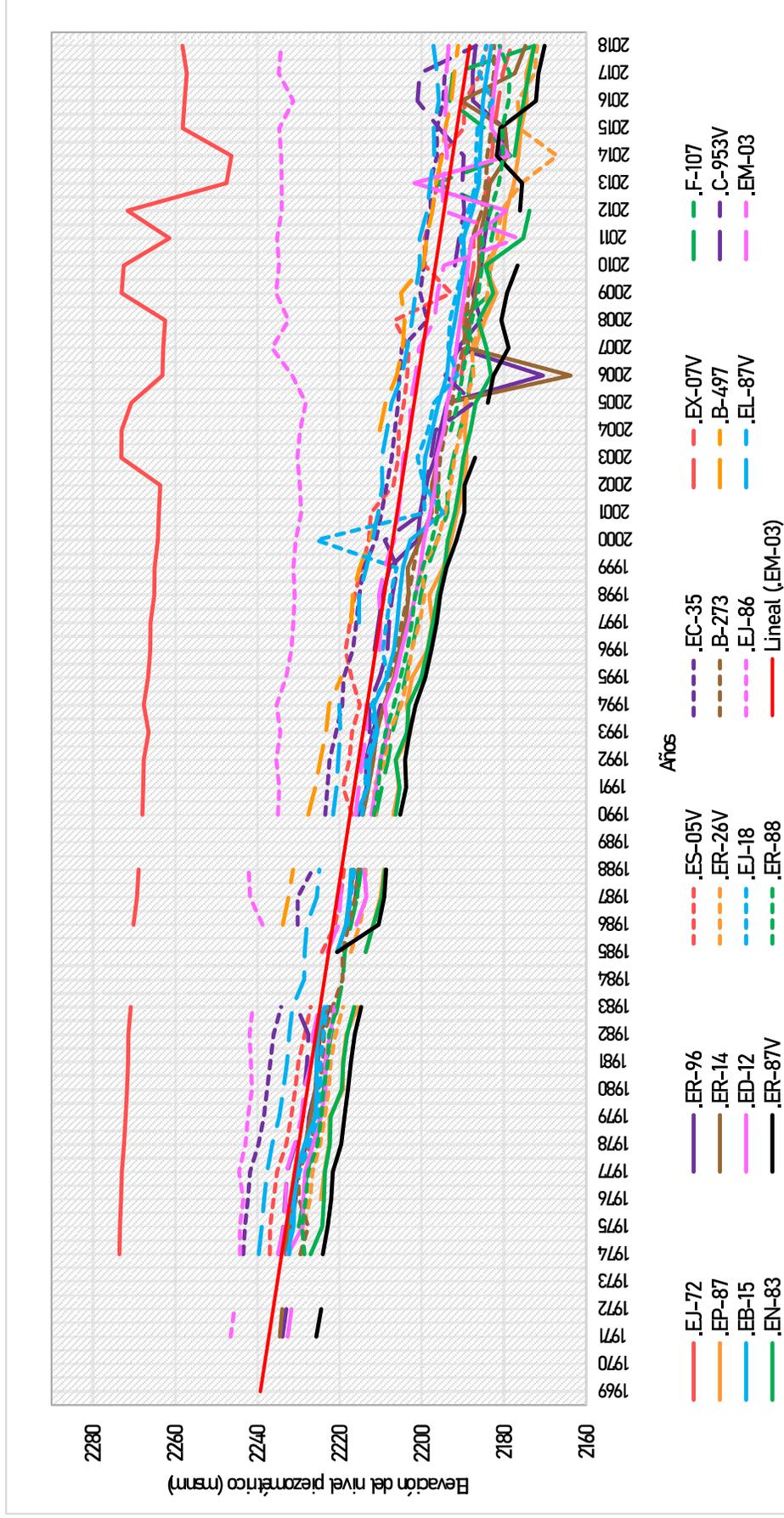


Figura 5.2. Comportamiento histórico de nivel piezométrico en el acuífero Texcoco (Elaborado con datos de la OCAVAM, 2018).

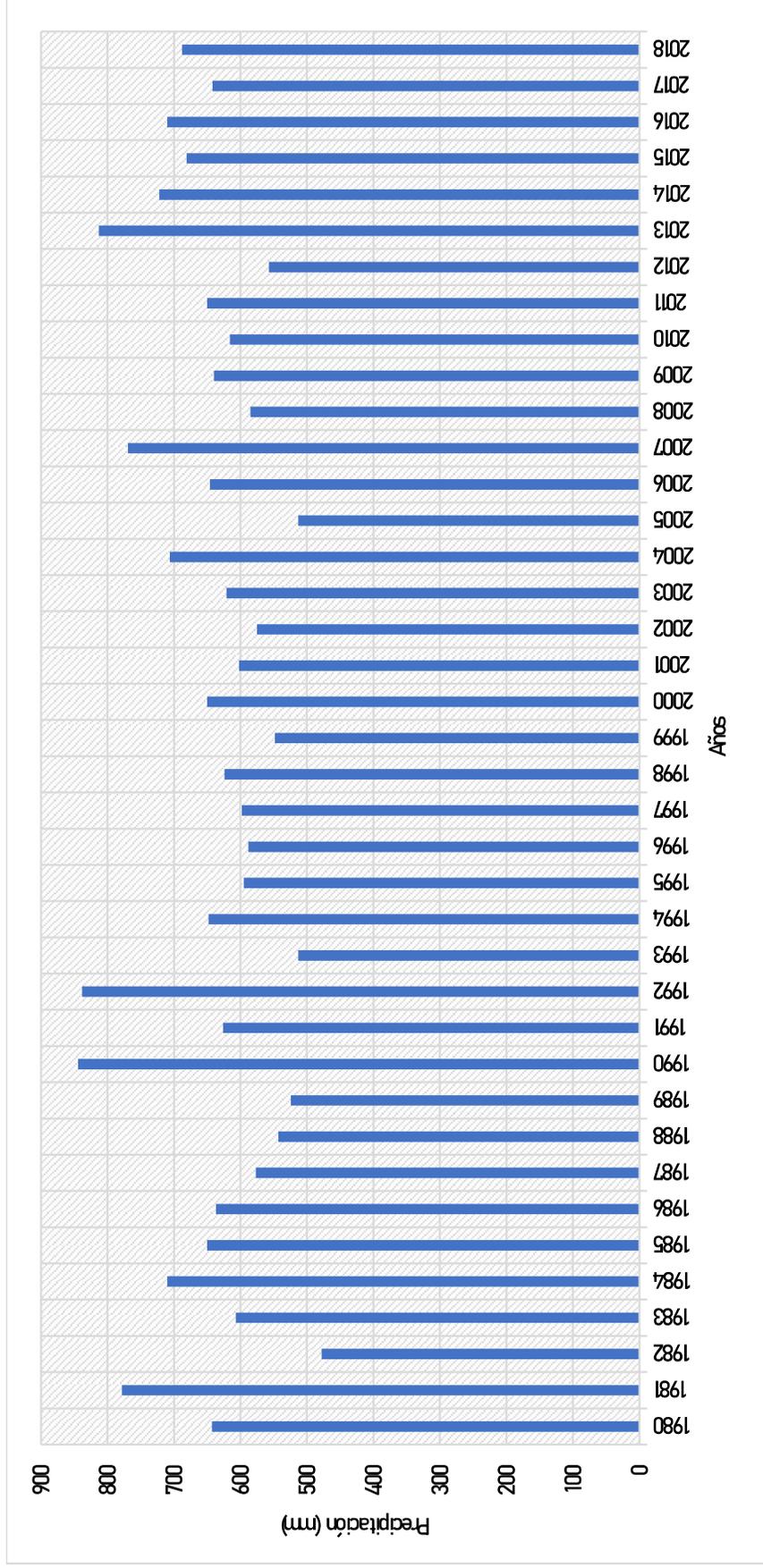


Figura 5.3. Comportamiento histórico de la precipitación media anual en el acuífero Texcoco (Elaborado con datos de Daymet, 2021).

5.3.3. Identificación de las unidades hidroestratigráficas

De acuerdo con la CONAGUA (2014), el acuífero Texcoco se clasifica como un acuífero de tipo libre a semiconfinado, conformado por 6 unidades hidroestratigráficas. En la figura 5.4 se muestran de manera espacial en el área de estudio. A continuación, se describen las unidades hidroestratigráficas (Suárez, 2019):

- **Unidad Hidroestratigráfica 1 (UH-1):**

Constituida por un paquete de arcillas deformables de aproximadamente 80 m de espesor promedio, asociadas a depósitos lacustres del Cuaternario que están intercaladas con lentes y estratos limo arenosos de vidrio volcánico de alrededor de 1 a 3 m de espesor. La unidad se encuentra sobresaturada con agua salina e hidrogeológicamente se comporta como un acuitardo que actúa como capa confinante de muy baja permeabilidad. Tiene un coeficiente de almacenamiento (S_y) de 0.03 (CONAGUA, 2006) y una transmisividad de 25.92 y 43.2 $m^2/día$ (CONAGUA, 2014). De acuerdo con Lesser (2005), debido a que esta unidad se encuentra saturada y permite el paso de agua muy lentamente, realiza un aporte al acuífero en explotación (UH-2) mediante “goteo” (figura 5.5).

- **Unidad Hidroestratigráfica 2 (UH-2):**

Se encuentra a partir de los 80 m y hasta los 300 m de profundidad, conformado por un parque areno-gravoso con intercalaciones de lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas cenizas. Esta unidad se encuentra saturada y corresponde al acuífero en explotación. De acuerdo con la CONAGUA, 2006, se le asignó un coeficiente de almacenamiento (S_y) de 0.15 y una transmisividad de 86.4 y 129.6 $m^2/día$ (CONAGUA, 2014).

- **Unidad Hidroestratigráfica 3 (UH-3):**

A partir de los 300 m de profundidad se encuentra un paquete compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas de unos 150 m de espesor. Esta unidad está compacta por lo que presenta una baja o nula permeabilidad y es considerada como el basamento hidrogeológico del acuífero principal (Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), 1969).

- **Unidad Hidroestratigráfica 4 (UH-4):**

Conformada principalmente por las coladas lávicas que forman parte de la Sierra Río Frío y Santa Catarina, con un espesor máximo en el centro de la Sierra Río Frío de 1800 m el cual se acuña hacia los alrededores. Esta unidad presenta una alta productividad en rocas volcánicas fracturadas que están localizadas en zonas de mayor elevación que corresponden a la zona de recarga mediante flujos subterráneos (figura 5.5). Actualmente en esta unidad se localizan los manantiales. De acuerdo con la CONAGUA (2006), tiene un coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.04.

- **Unidad Hidroestratigráfica 5 (UH-5):**

Esta unidad está caracterizada por rocas volcánicas (tobas y brechas) interestratificadas con lavas de composición andesítica, posee un espesor mayor a los 1500 m. Estas rocas se encuentran fracturadas, aunque hidrogeológicamente se consideran de baja productividad. De acuerdo con la CONAGUA (2006) tiene un coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.2 así como una transmisividad de 172.8 m²/día (CONAGUA, 2014).

- **Unidad Hidroestratigráfica 6 (UH-6):**

Constituida por depósitos piroclásticos (tobas y lahares) que se encuentran interdigitados con cenizas y lavas que fueron originados por procesos gravitacionales y eruptivos de edad del Cuaternario. Esta unidad aflora al pie de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y Sierra de las Cruces, presentando un espesor promedio de 350 m y se acuña por debajo por la unidad hidrogeológica 2 (UH-2). Esta unidad actualmente funciona como zona de recarga para el acuífero por medio de flujos subterráneos y (figura 5.5). Tiene un coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.2 (CONAGUA, 2006) y una transmisividad de 126.6 y 259.2 m²/día (CONAGUA, 2014).

5.3.4. Definición del régimen de flujo de agua subterránea

Con el objetivo de comprender el funcionamiento del agua subterránea en el acuífero Texcoco, se realizó la configuración del nivel piezométrico con datos del año 2018, esta configuración piezométrica se elaboró únicamente con información de 34 pozos de observación (tabla 5.1), localizados en el acuífero Texcoco, ya que, no se dispuso de información del acuífero Cuautitlán – Pachuca y el acuífero de la Ciudad de México.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

El esquema (figura 5.4) muestra elevaciones de la superficie piezométrica que van de 2 165 msnm al sureste de la Sierra Guadalupe y el evaporador solar El Caracol, en el municipio de Ecatepec de Morelos. La superficie piezométrica se incrementa hacia las estribaciones del valle hasta alcanzar los 2 220 msnm al noroeste en los límites con el acuífero Cuautitlán – Pachuca y se distribuyen de forma semi-paralela en la región de estudio con las isolíneas de superficie piezométrica de 2 180 y 2 190 msnm.

Además, se observa un domo piezométrico de 2 170 msnm hacia el norte del cerro El Pino, entre los municipios Chicoloapan y Texcoco, dónde se aprecian entradas del flujo subterráneo provenientes del sur del acuífero. Al norte de acuífero en el municipio de Atenco, se observa otro domo piezométrico de 2 165 msnm cuyas entradas por flujo subterráneo provienen del acuífero Cuautitlán – Pachuca y del oriente del acuífero.

Los principales flujos del agua subterránea provienen de la dirección este, es decir del Monte Tlalóc hacia la planicie del Ex Lago de Texcoco, así como un flujo proveniente del acuífero Cuautitlán – Pachuca y que atraviesa la porción noroeste del acuífero, en el área donde se encuentra el evaporador solar “El Caracol” y se dirige hacia el pie de la Sierra de Guadalupe.

Asimismo, se observa otro flujo proveniente del cerro El Pino, en el límite sur del acuífero y que se dirige hacia el centro del acuífero, en la zona plana. Se infiere que el acuífero pudiera tener una salida de agua subterránea que se dirige hacia el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México esta salida se infiere que ocurra al norte de Sierra Santa Catarina.

Finalmente, el comportamiento de las isolíneas de flujo para este año en análisis está principalmente asociado al efecto topográfico de la región, así como la alta concentración de pozos de extracción existentes en la zona productiva del acuífero.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Tabla 5.1. Pozos de observación localizados en el acuífero Texcoco para la definición del régimen de flujo del año 2018.

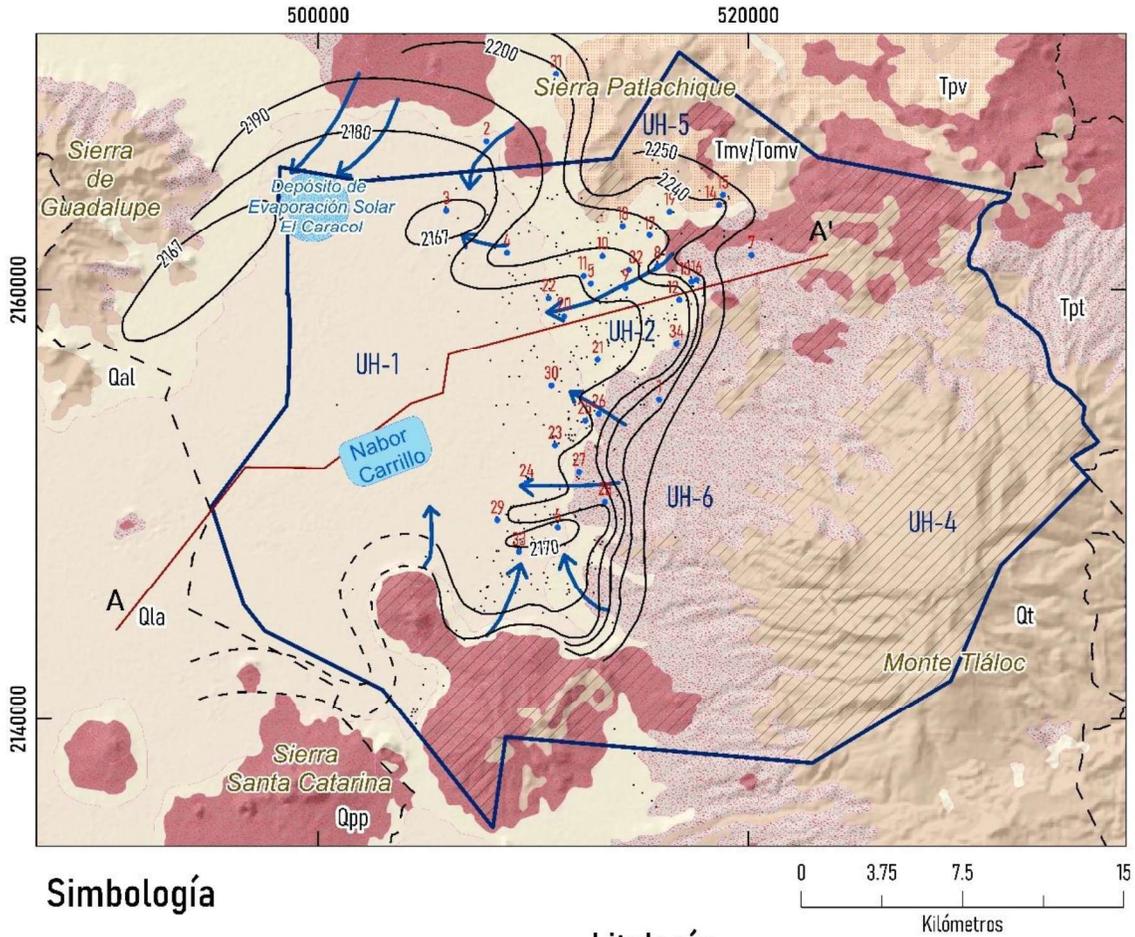
ID pozo	ID	Coordenadas		Elevación (msnm)	Profundidad del nivel 2018 (m)	Elevación del nivel 2018 (msnm)
		Longitud X	Latitud Y			
BO-37V	1	515860	2154870	2352	123.20	2229
B-273	2	507830	2166924	2244	61.58	2182
B-465	3	505961	2163726	2243	75.54	2167
B-497	4	508783	2161714	2264	72.80	2191
C-953V	5	512686	2160290	2252	65.23	2187
D-868	6	511146	2148940	2251	86.24	2165
DO-35	7	520159	2161604	2371	100.84	2270
EA-82	8	515788	2161123	2272	33.50	2239
EB-15	9	514299	2160088	2258	74.91	2183
EC-11	10	513227	2161552	2253	66.26	2187
ED-12	11	512356	2160643	2251	70.15	2181
EJ-18	12	516804	2159534	2275	90.65	2184
EJ-20	13	517369	2160384	2285	50.03	2235
EJ-51V	14	518650	2163988	2292	54.69	2237
EJ-72	15	518830	2164447	2293	34.83	2258
EJ-86	16	517603	2160466	2280	45.84	2234
EL-87V	17	515421	2162547	2263	65.82	2197

Fuente: Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM).

Tabla 5.1. Pozos de observación localizados en el acuífero Texcoco para la definición del régimen de flujo del año 2018 (continuación).

ID pozo	ID	Coordenadas		Elevación (msnm)	Profundidad del nivel 2018 (m)	Elevación del nivel 2018 (msnm)
		Longitud X	Latitud Y			
EM-03	18	514170	2162998	2258	64.51	2193
EM-74	19	516352	2163662	2275	63.39	2212
EN-83	20	511442	2158767	2246	73.33	2173
EO-20	21	512999	2156719	2252	76.98	2175
EP-87	22	510721	2159609	2245	72.31	2173
ER-14	23	511021	2152754	2248	73.18	2175
ER-26V	24	509692	2150985	2245	73.06	2172
ER-87V	25	512431	2153896	2252	81.90	2170
ER-88	26	513050	2154210	2265	83.90	2181
ER-96	27	512131	2151504	2260	73.10	2187
.ES-05V	28	513344	2150127	2296	11.78	2184
.ET-77V	29	508333	2149284	2249	69.8	2180
.EX-07V	30	510853	2155517	2247	68.8	2187
.E-44V	31	511068	2170050	2273	73.14	2200
.E-708V	32	514453	2160919	2257	73.15	2184
.F-107	33	509340	2147819	2248	75.44	2173
.110-B	34	516669	2157498	2290	106	2284

Fuente: Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM).



Simbología

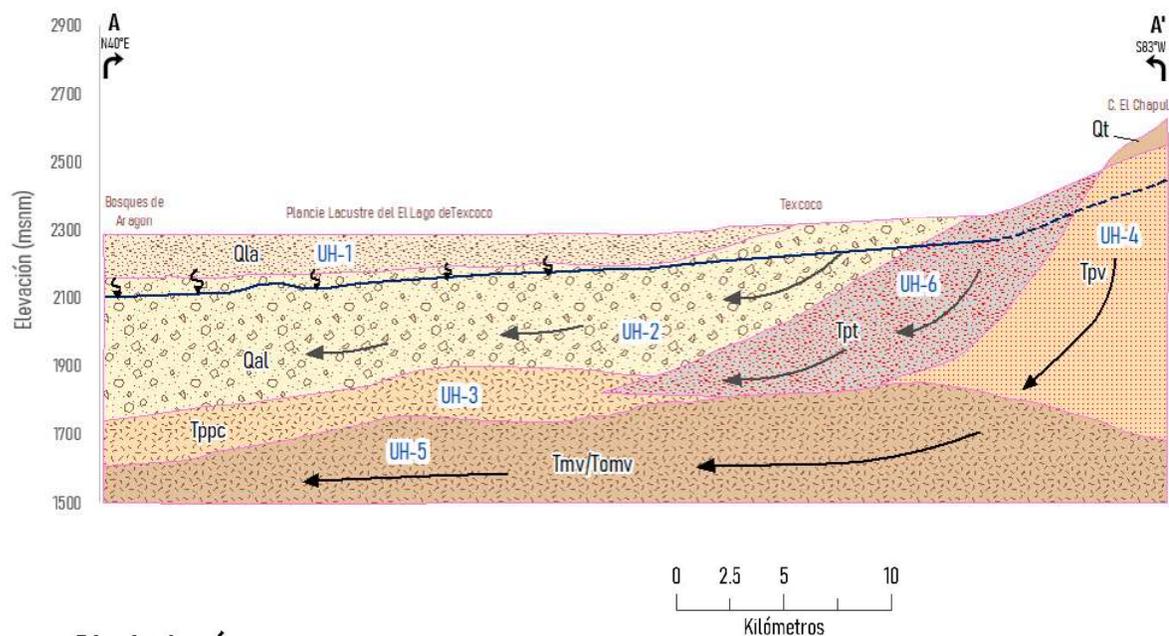
- - - Límite estatal
- Acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Sección hidrogeológica
- Isolínea de nivel de agua subterránea 2018
- Isolínea de nivel de agua subterránea inferida 2018
- Pozos de observación
- Pozos de extracción

Litología

- | | | |
|-------------------------|--|-------------------------------------|
| Acuitardo | | Arcillas lacustres |
| Medio Poroso | | Depósitos aluviales |
| | | Toba volcánica y depósitos de Lahar |
| | | Coladas lávicas |
| Medio Fracturado | | Derrames lávicos, ceniza volcánica |
| | | Depósitos volcánicos |
| | | Rocas volcánicas extrusivas |

Figura 5.4. Unidades hidroestratigráficas del acuífero Texcoco y de elevación del nivel piezométrico del año 2018.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados



Simbología

- Nivel estático
- Nivel estático inferido
- ↪ Flujo regional
- ↪ Flujo local
- ⤿ Goteo

Unidades Hidroestratigráficas

- UH-1 Acuífero confinante de baja permeabilidad
- UH-2 Acuífero principal superior
- UH-3 Basamento del acuífero, unidad de baja permeabilidad
- UH-4 Unidad de alta productividad con permeabilidad por fracturamiento
- UH-5 Unidad de media-baja productividad con permeabilidad por fracturamiento
- UH-6 Unidad por la que se infiltra el agua que recarga al acuífero

Figura 5.5. Sección hidrogeológica A – A' del acuífero Texcoco (Suárez, 2019).

5.3.5. Identificación de las descargas del acuífero

Las descargas del acuífero pueden ocurrir principalmente por descargas a caudal base de ríos, sin embargo, de acuerdo con lo mencionado en las características del área de estudio los escurrimientos presentes en la región son de tipo efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y se mantienen secos durante la temporada de estiaje, por lo que las descargas a caudal base quedaron descartadas.

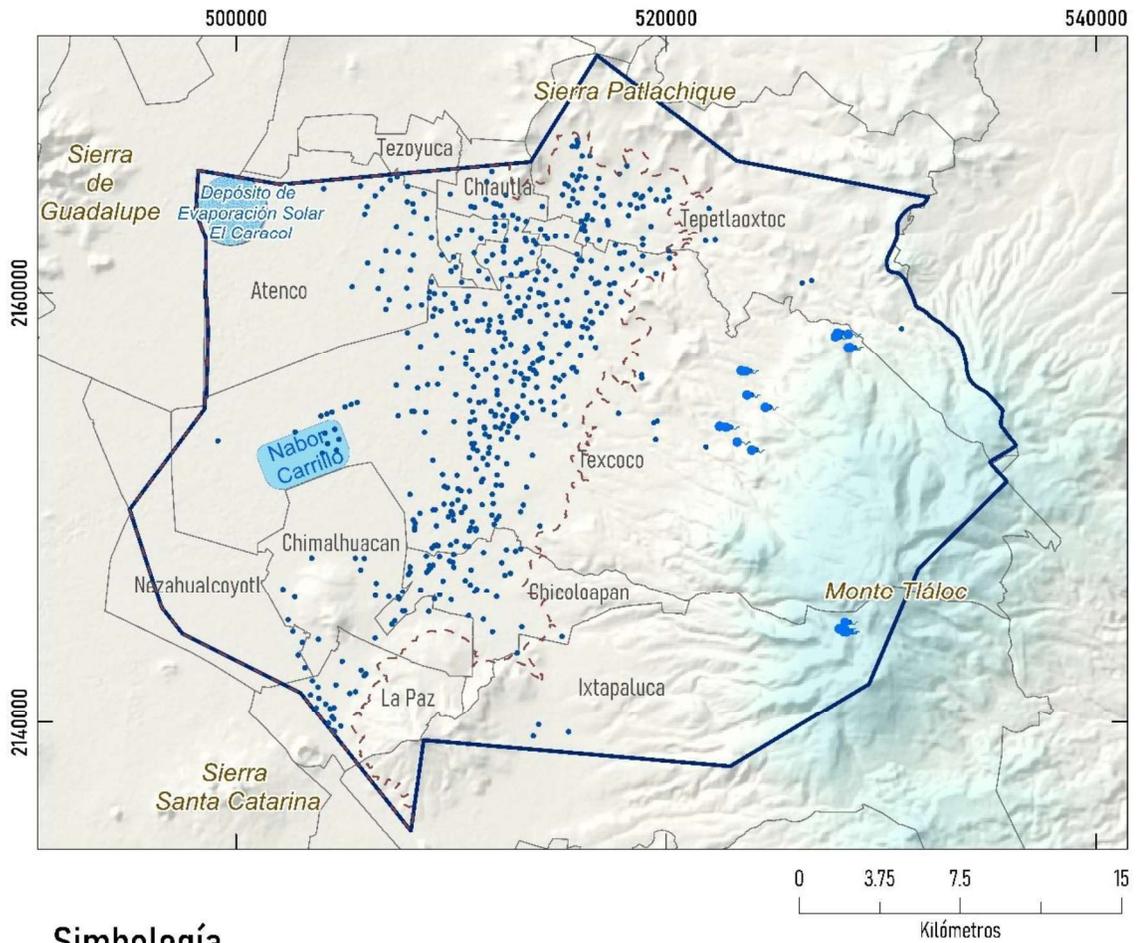
Otro mecanismo de descarga es mediante la evapotranspiración y debido a la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea fue descartada, ya que solo se puede considerar descarga por evapotranspiración cuando el nivel del agua subterránea es somero.

Las formas de descarga que se presentan en la región son de forma de natural a través de manantiales y de forma artificial a través de pozos de bombeo de agua subterránea. Para conocer el volumen de descarga se consultó el censo de aprovechamientos realizados por la CONAGUA en el año 2006, así como el volumen reportado ante el REPDA para el año 2019.

La CONAGUA reportó en los resultados del censo del año 2006, que, de los 574 aprovechamientos inscritos ante el REPDA, solo 487 se identificaron dentro de los límites administrativos del acuífero, 24 se identificaron fuera y 63 no se encontraron, se identificaron específicamente 24 en el municipio de Texcoco, 15 en Chimalhuacán y 6 en Chicoloapan.

En el 2006 se censaron un total de 1 010 aprovechamientos en el AT, de los cuales 540 eran activos y 470 inactivos (CONAGUA, 2014). En este censo se consideró en nuevo límite administrativo del acuífero y hubo 12 aprovechamientos que a pesar de estar registrados en el acuífero Cuautitlán – Pachuca, se consideraron en el acuífero Texcoco al estar en el límite de la nueva poligonal del acuífero, por lo que se acumuló un total de 553 aprovechamientos activos para este año (figura 5.6). En la tabla 5.2 se presentan los volúmenes de extracción obtenidos en el censo, siendo el total 183.03 hm³/año, de los cuales 10.43 hm³/ año corresponden a 18 manantiales localizados en el municipio de Texcoco.

De acuerdo con los resultados del volumen de descarga de usuarios registrados ante el REPDA en el corte del año 2019, de los 520 pozos de extracción (figura 5.7) se genera una descarga total de 243.67 hm³/año y 8.81 hm³/año corresponden a descargas por manantiales. En la tabla 5.3 se muestra el volumen de extracción generado para los usos del agua.



Simbología

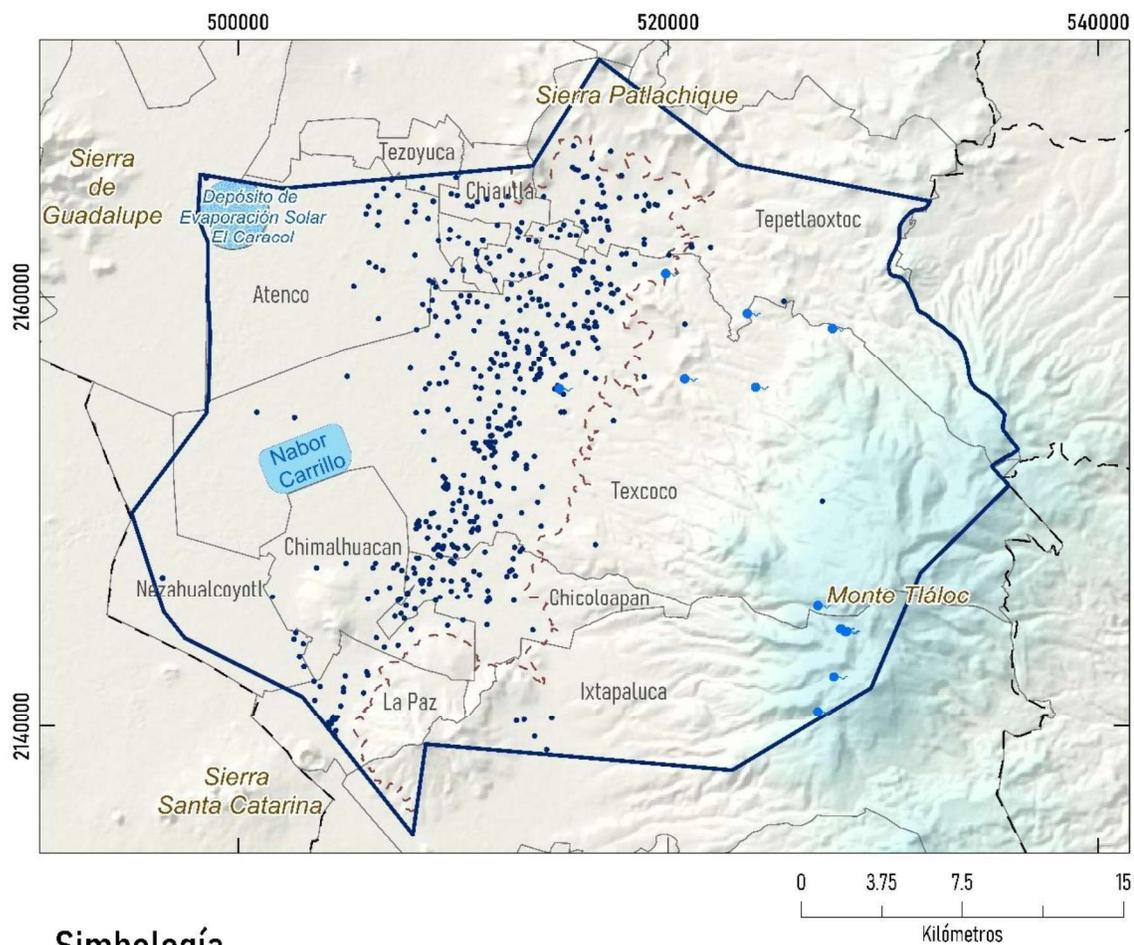
- - - Límite estatal
- Límite municipal
- Pozos de extracción
- Manantial
- Cuerpos de agua
- Área de balance

Figura 5.6. Distribución de los pozos registrados en el censo del año 2006 (CONAGUA, 2007).

Tabla 5.2. Volumen de extracción obtenidos en el censo de aprovechamientos del año 2006

Municipio	Tipo de aprovechamiento	No. de aprovechamientos	Extracción por usos (hm ³ /año)				Extracción total por municipio hm ³ /año
			Agrícola	Público Urbano	Pecuario	Industrial	
Texcoco	Pozos	293	26.82	36.32	.70	.86	66.18
	Manantiales	18	7.26	3.10	0	0	10.43
	Norias	1	0	0	0	0	0.005
Atenco	Pozos	31	3.16	2.99	0	0.03	6.19
Chiautla	Pozos	36	2.33	2.51	0.02	0	4.96
	Norias	1	0.0031	0	0.0006	0	0.0041
Chicoloapan	Pozos	37	1.31	17.69	0.03	0.006	19.07
Chiconcuac	Pozos	13	1.71	1.75	0	0	3.47
Chimalhuacán	Pozos	21	0.44	33.77	0.03	0	34.59
Ixtapaluca	Pozos	4	0.36	0.72	0	0	1.09
La Paz	Pozos	22	0	25.69	0	2.75	28.44
Nezahualcóyotl	Pozos	1	0	2.20	0	0	2.20
Papalotla	Pozos	7	.44	0.63	0	0	1.12
Tepetlaoxtoc	Pozos	61	2.97	1.61	0.02	0	4.65
	Norias	3	0.006	0	0	0	0.07
Tezoyuca	Pozos	3	.35	0.13	0	0	0.48
Total (hm³/año)		558	47.27	129.16	0.82	3.66	183.03

Fuente: CONAGUA, 2007.



Simbología

- - - Límite estatal
- Límite municipal
- Pozos de extracción
- Manantial
- Cuerpos de agua
- Área de balance

Figura 5.7. Distribución de los pozos de extracción inscritos ante el REPDA 2019 (CONAGUA, 2021).

Tabla 5.3. Volumen de extracción por uso registrado ante el REPDA, 2019.

Municipio	No. de aprovechamientos	Extracción por usos (hm ³ /año)							Extracción total por municipio (hm ³ /año)	
		Agrícola	Público Urbano	Pecuario	Industrial	Usos múltiples	Doméstico	Servicios		Otros
Texcoco	302	29.56	9.42	1.85	1.17	22.80	0.1677	0.55	0.38	66.0
Atenco	21	8.86				0.78				9.44
Chalco	1					0.21				0.21
Chiautla	28	3.77	0.52	0.082	0.02	0.57				5.0
Chicoloapan	45	4.24	9.83	0.002	0.18	6.50	0.0008	0.012	0.5	21.26
Chiconcuac	16	1.79	1.08							2.87
Chimalhuacán	27	2.04	39.35	0.001	0.007		0.0021	0.039		41.43
Ecatepec	3	0.15	75.07		0.003					75.32
Ixtapaluca	7	1.38	0.31					0.092		1.782
La Paz	15		9.33	0.01	1.78			0.008		11.12
Papalotla	6	0.63	0.13			0.12				0.61
Tepetlaotoc	45	2.55	0.80	0.12	0.36	2.62				6.45
Tezoyuca	4	1.30			0.1		0.001			1.40
Total (hm³/año)	520	56.73	145.84	2.07	3.63	33.65	0.17	0.70	0.88	243.67

Fuente: CONAGUA, 2019

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

En el modelo conceptual de recarga (figura 5.8) se identifica que el acuífero Texcoco es de tipo libre a semiconfinado (CONAGUA, 2014), el cual originalmente se encontraba en una condición de confinamiento que con el paso del tiempo fue perdiendo carga hidráulica debido a la explotación intensiva mediante pozos de extracción (CONAGUA, 2005a) ocasionando su condición actual.

En el acuífero, la principal entrada de agua proviene de la precipitación que se infiltra en las unidades hidroestratigráficas UH-4 y UH-6 y recargan al acuífero mediante flujos subterráneos, los cuales siguen siendo de tipo local y generan flujos de descarga en la porción centro oeste del acuífero. Las descargas ocurren de forma natural principalmente por evapotranspiración, así como manantiales y escurrimientos de carácter torrencial en la región montañosa, algunos de ellos pueden llegar a infiltrarse al acuífero al llegar a la planicie, de acuerdo con la CONAGUA (2005a), cuando el AT se encontraba en una condición de confinamiento se presentaban descargas mediante pozos artesianos en la planicie. Las descargas de forma artificial ocurren a través de pozos de extracción que están localizados principalmente en la unidad hidroestratigráfica UH-2.

De acuerdo con Suárez (2019), la unidad hidroestratigráfica UH-1 actúa como capa semiconfinante, la cual aporta un volumen de agua al acuífero (unidad UH-2) mediante el proceso de goteo, este proceso ocurre cuando la presión del acuífero llega a ser inferior que la del acuitardo semiconfinante (ocasionado por el bombeo prolongado) y, por lo tanto, el agua se filtra desde el acuitardo hacia el acuífero, esta condición también depende de las propiedades hidráulicas del medio (Sánchez, 2017).

Debajo de la unidad UH-1 se encuentra la unidad hidroestratigráfica UH-2, la cual aflora en superficie al este del área de estudio. La unidad se encuentra saturada y corresponde al acuífero en explotación, además, cuenta con pozos de observación con información, lo que facilita la implementación del método de balance hídrico del acuífero en la determinación del cambio de almacenamiento. En la unidad UH-6 también se localizan algunos pozos de extracción y observación, sin embargo, la unidad se acuña en profundidad y principalmente se comporta como zona de recarga mediante flujos subterráneos, las cuales se pueden determinar aplicando la Ley de Darcy.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Los cambios en el comportamiento hidrodinámico del acuífero Texcoco como consecuencia de la extracción intensiva a la que se encuentra sometido, repercutió en el establecimiento de la temporalidad para el método de balance del acuífero y en la definición del área de balance, ya que el espesor de las unidades, específicamente la unidad UH-1 (acuitardo) es variable en la Cuenca de México y dificultó la estimación del volumen de agua por goteo que aporta el acuitardo al acuífero.

Por otra parte, el ensamble del modelo conceptual identifica que, la entrada de agua al acuífero ocurre principalmente por la precipitación que se infiltra en áreas donde el suelo lo permite y se mueve como flujo subterráneo recargando al acuífero y que al mismo tiempo descarga de forma natural hacia el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. También, se producen otras descargas naturales mediante la evapotranspiración conformada por la evaporación del agua a nivel del suelo y la transpiración de la vegetación, respecto al agua subterránea, debido a su profundidad, se asume que la evapotranspiración no debe ser considerada. Finalmente, en la zona montañosa se encuentran otras descargas naturales a través de manantiales y escurrimientos de carácter torrencial, los cuales se infiltran al llegar a la planicie y en zonas donde las condiciones son favorables.

Como descargas artificiales en el acuífero Texcoco ocurren mediante pozos de extracción, los cuales se localizan principalmente en la unidad UH-2 y en pequeñas porciones sobre la unidad UH-1 pero extraen agua de la unidad UH-2.

Dicho lo anterior, el modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco, permitió comprender y demostrar la aplicación de los métodos balance hídrico para complementar los resultados e interpretarlos con lo establecido en el modelo conceptual, todo esto con apoyo del software SIG, en el procesamiento, visualización y análisis de la información.

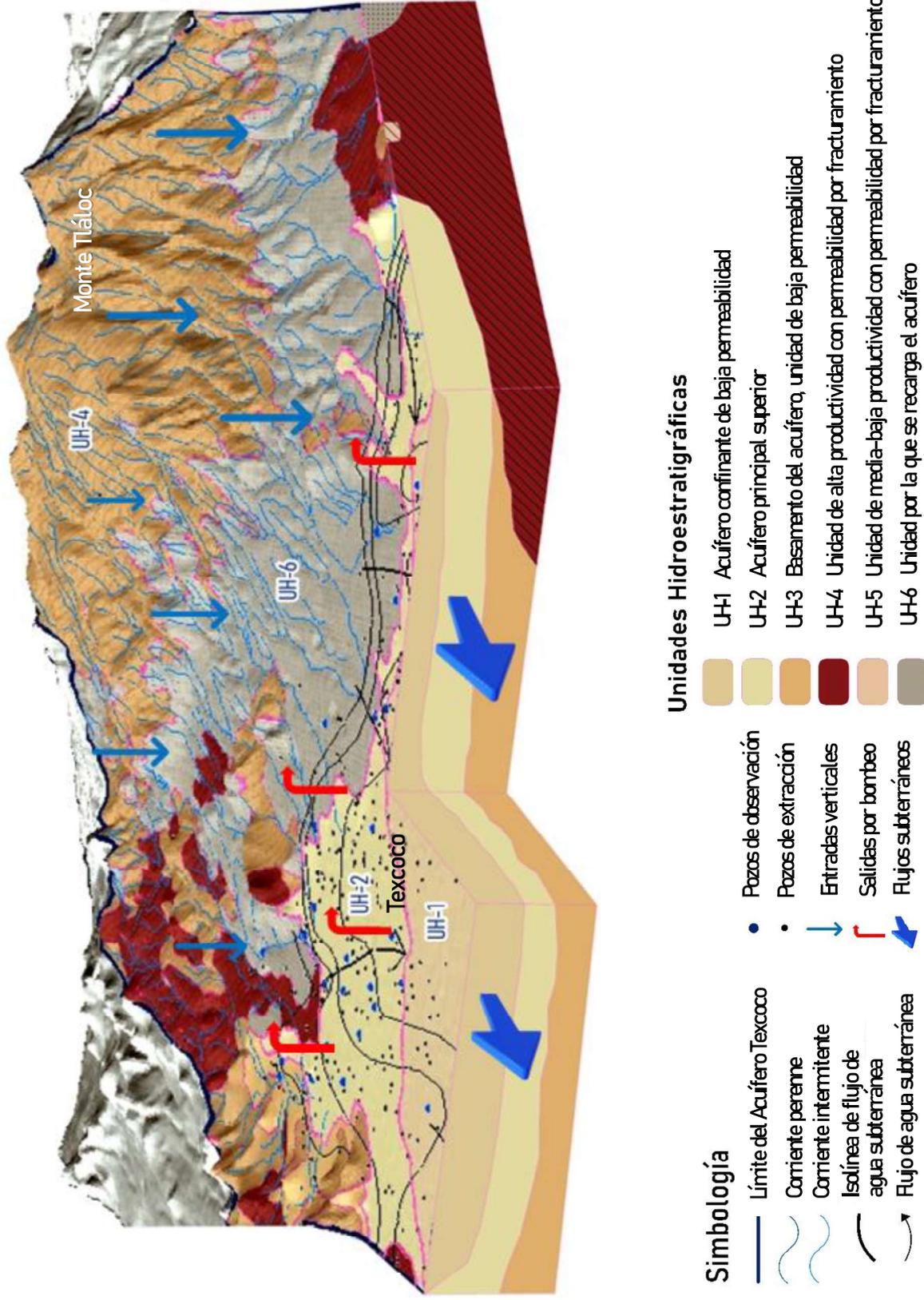


Figura 5.8. Modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco.

5.4. Estimación de la recarga total por el método del balance hídrico del acuífero

Para estimar la recarga total por el método establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015, en el que se estima a partir del cambio de almacenamiento y de los valores de descarga en el acuífero los cuales se obtuvieron del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) para el año 2019 y de un censo de extracciones correspondiente al año 2006.

5.4.1. Cálculo de la recarga inducida del acuífero

De acuerdo con el informe de disponibilidad del acuífero Texcoco del año 2014, en la tabla 5.4 se muestran los volúmenes de extracción destinados al uso agrícola y público urbano los cuales fueron tomados del censo de aprovechamientos del año 2006. Para el caso del volumen de uso agrícola se sumó el volumen anual derivado de las aguas superficiales. Finalmente, la suma del volumen de infiltración por riego y fugas en redes de agua potable y alcantarillado reflejaron el volumen total de recarga inducida del acuífero de 5.26 hm³.

5.4.2. Cálculo de las entradas y salidas del acuífero por flujo subterráneo

El volumen de entradas por flujo subterráneo se obtuvo a través de doce celdas, se observa que las principales entradas al acuífero provienen del Monte Tlaloc hacia el este (figura 5.9), al norte, se identificó una entrada del acuífero Cuautitlán – Pachuca y al sur dos celdas provenientes de la Sierra Santa Catarina. También, se identificó una celda de salida hacia el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Finalmente se obtuvo un volumen de entrada de 43.23 hm³ y 0.73 hm³ de salidas (tabla 5.5).

Tabla 5.4. Volumen de extracción para obtener la recarga inducida del acuífero.

Uso	Volumen de agua subterránea (hm ³)	Volumen de agua superficial (hm ³)	Volumen total (hm ³)	Volumen de infiltración (hm ³)
Agrícola	47.27	86.4	133.67	2.67
Público urbano	129.6		129.6	2.59
Recarga inducida (hm³)				5.26

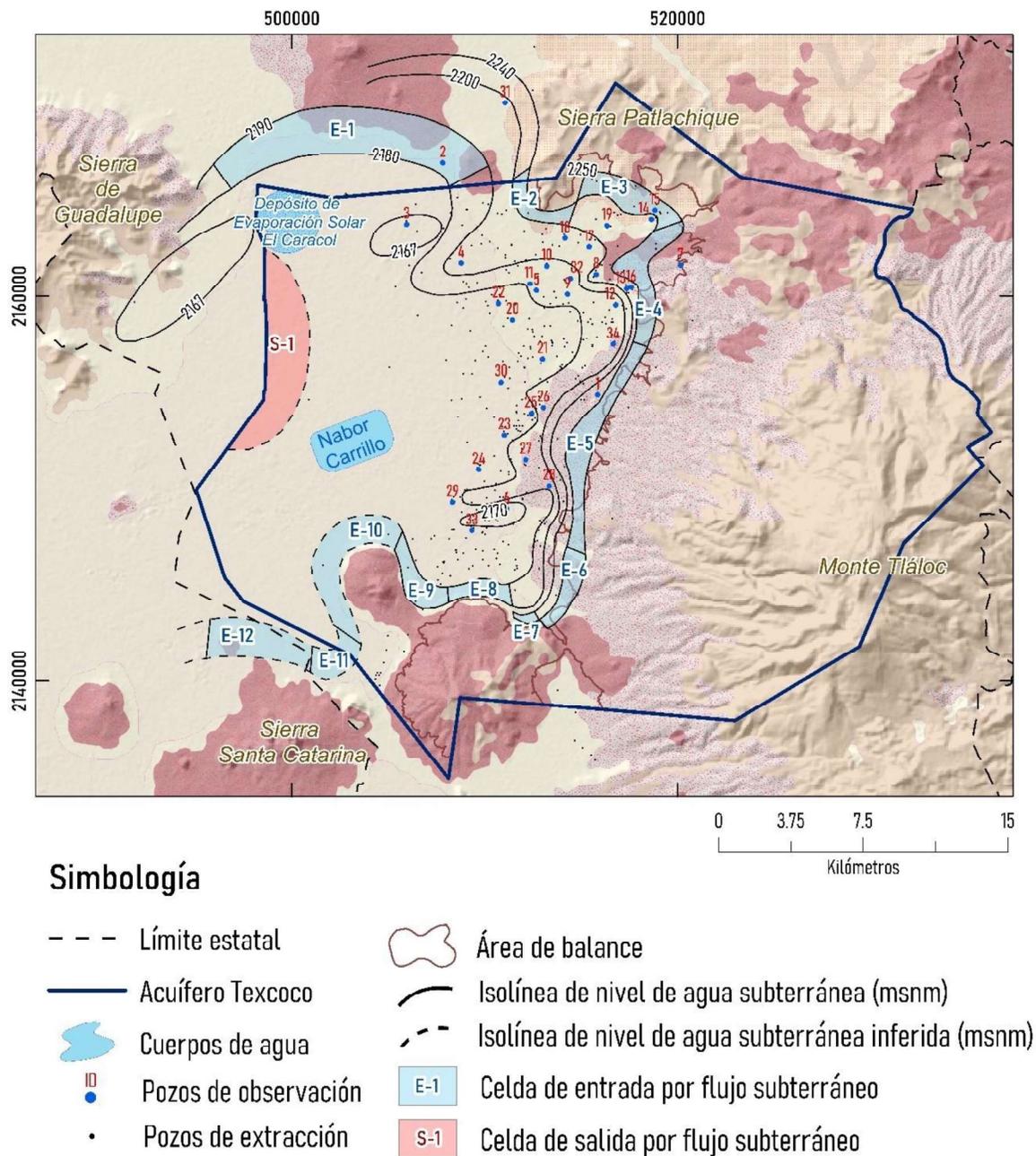


Figura 5.9. Celdas de entrada y salida por flujos subterráneos en el acuífero Texcoco, 2018

Tabla 5.5. Cálculo de entradas y salidas por flujo subterráneo en el acuífero Texcoco 2018.

Celda	Longitud (B) (m)	Ancho (a) (m)	h1 (msnm)	h2 (msnm)	h (m)	Gradiente		Caudal (Q) (m ³ /día)	Volumen (hm ³ /año)
						Hidráulico (i)	Transmisividad (T) (m ² /día)		
E-1	14070	2427	2190	2180	10	0.004	129.6	7513.27	2.74
E-2	4426	842	2240	2200	40	0.047	129.6	27249.86	9.94
E-3	5391	1380	2250	2240	10	0.007	172.8	6750.46	2.46
E-4	6696	1191	2250	2240	10	0.008	259.2	14572.65	5.31
E-5	11497	1040	2250	2240	10	0.009	259.2	28654.06	10.45
E-6	4374	989	2250	2240	10	0.010	259.2	11463.50	4.18
E-7	1263	425	2250	2240	10	0.023	129.6	3851.40	1.40
E-8	3373	869	2190	2180	10	0.011	129.6	5030.38	1.83
E-9	4302	1377	2190	2180	10	0.007	129.6	4048.94	1.47
E-10	8320	1473	2190	2180	10	0.006	86.4	4880.16	1.78
E-11	2856	1303	2190	2180	10	0.007	86.4	1893.77	0.69
E-12	5516	1876	2190	2180	10	0.005	86.4	2540.41	0.92
Volumen total de entradas por flujo subterráneo (hm³)									43.23
<hr/>									
SALIDAS									
<hr/>									
S1	9980	2128	1175	1170	5	0.00234962	86.4	2026.01	0.73
Volumen total de salidas por flujo subterráneo (hm³)									0.73

5.4.3. Cálculo del cambio de almacenamiento del acuífero

El cambio del almacenamiento se obtuvo mediante el trazado de isolíneas de evolución piezométrica para el periodo establecido (año 2006 al 2018), es decir 12 años en análisis. Esta técnica utiliza la evolución piezométrica promedio de los niveles de agua subterránea que genera cada polígono en el periodo establecido. Como resultados se obtuvo la evolución de los niveles para cada uno de los pozos de observación seleccionados (tabla 5.6).

De forma general, las isolíneas de evolución piezométrica para el periodo 2006 – 2018 (figura 5.10) muestran descensos del nivel de agua subterránea de hasta -15 m al sur del acuífero entre las unidades hidroestratigráficas UH-2 y UH-6, también hacia el norte, cerca de los límites con el acuífero Cuautitlán – Pachuca, en la unidad UH-2. Así mismo se observa que la mayor parte del área de balance del acuífero presenta descensos de -10 a -5 m, comprendiendo pequeñas porciones de la unidad UH-6 y gran parte de la unidad UH-2 la cual concentra la mayoría de los pozos de extracción de agua subterránea.

Debido a la falta de pozos de observación y pozos de extracción en la porción oeste del acuífero se infirieron las isolíneas de -10 m y -5 m con apoyo de los pozos de observación del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México: 26, 27, 29 y 31. Una vez conocidas las dimensiones de los polígonos de evolución piezométrica (figura 5.11) se calculó un cambio de almacenamiento del acuífero Texcoco de -55.55 hm³ (tabla 5.7).

Tabla 5.6. Evolución piezométrica de los pozos de observación para el periodo 2006 —2018

ID Pozo	ID	Coordenadas		Profundidad del nivel 2006 (m)	Profundidad del nivel 2018 (m)	Evolución del nivel (m)
		X	Y			
.BO-37V	1	515860	2154870	102.37	123.20	-20.83
.B-273V	2	507830	2166924	52.23	61.58	-9.35
.B-465V	3	505961	2163726	57.56	75.54	-17.98
.B-497V	4	508783	2161714	57.90	72.80	-14.90
.C-953V	5	512686	2160290	57.73	65.23	-7.50

Tabla 5.6. Evolución piezométrica de los pozos de observación para el periodo 2006 —2018

(continuación).

ID Pozo	ID	Coordenadas		Profundidad	Profundidad	Evolución
		X	Y	del nivel 2006 (m)	del nivel 2018 (m)	del nivel (m)
.D-868	6	511146	2148940	70.93	86.24	-15.31
.DO-35	7	520159	2161604	98.63	100.84	-2.21
.EB-15	8	514299	2160088	64.14	74.91	-10.77
.EC-11	9	513227	2161552	57.82	66.26	-8.44
.ED-12	10	512356	2160643	58.63	70.15	-11.52
.EJ-18	11	516804	2159534	83.62	90.65	-7.03
.EJ-51V	12	518650	2163988	48.00	54.69	-6.69
.EJ-72	13	518830	2164447	29.96	34.83	-4.87
.EL-87V	14	515421	2162547	58.19	65.82	-7.63
.EM-03	15	514170	2162998	56.43	64.51	-8.08
.EM-74	16	516352	2163662	59.21	63.39	-4.18
.EN-83	17	511442	2158767	62.83	73.33	-10.50
.EO-20V	18	512999	2156719	64.50	76.98	-12.48
.ER-26V	19	509692	2150985	57.60	73.06	-15.46
.ER-87V	20	512431	2153896	69.46	81.90	-12.44
.ER-88	21	513050	2154210	74.90	83.90	-9.00
.ES-05V	22	513344	2150127	92.46	111.78	-19.32
.ET-77V	23	508333	2149284	52.47	69.31	-16.84
.EX-07V	24	510853	2155517	56.62	68.80	-12.18
.F-107	25	509340	2147819	60.01	75.44	-15.43
.110-B	26	516669	2157498	94.26	106.00	-11.74
.6695	27	491682	2152243	23.5	30.4	-6.9
.8138	28	492163	2159518	56.2	69.67	-13.47
.BX-50V	29	496559	2164867	59	75	-16.41
.2239	30	501480	2127565	43.36	54	-10.64
.2599	31	490268	2136564	72	85	-13.26

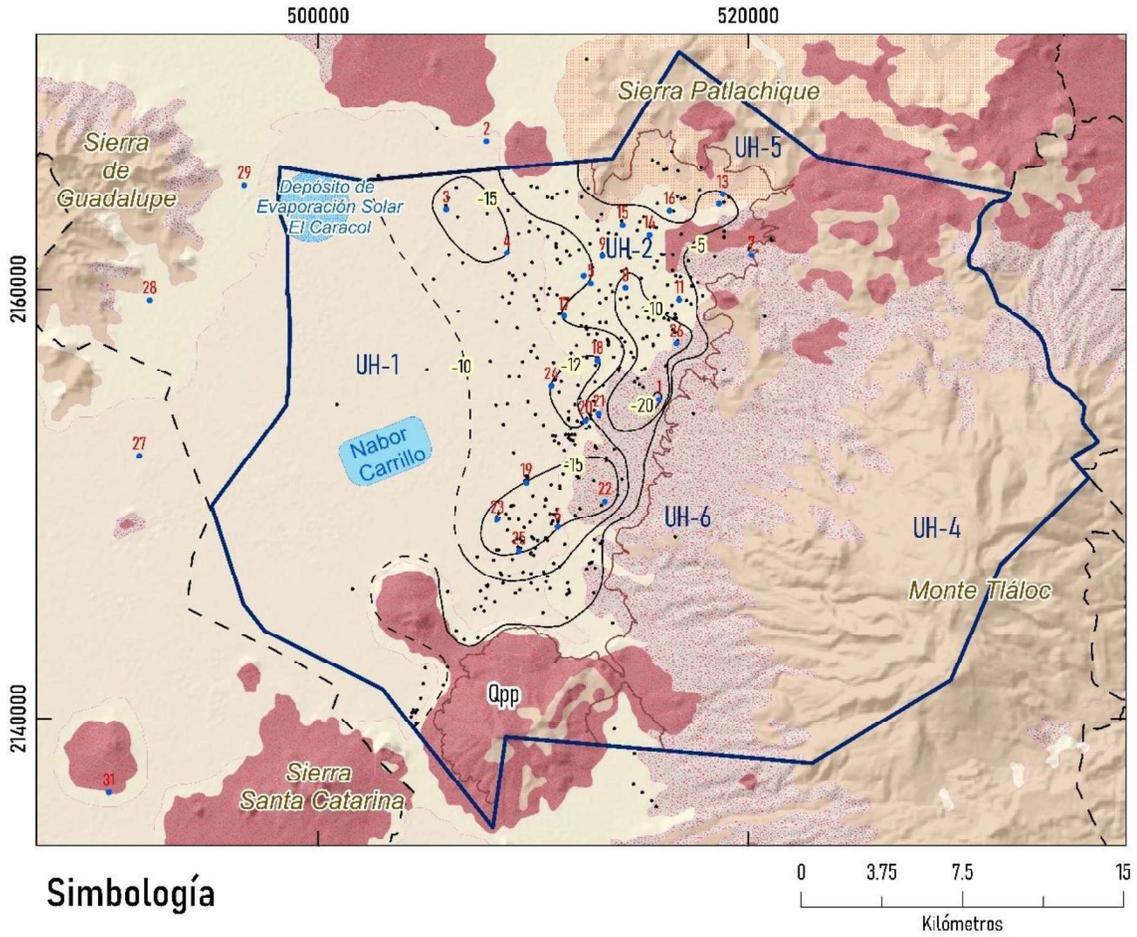
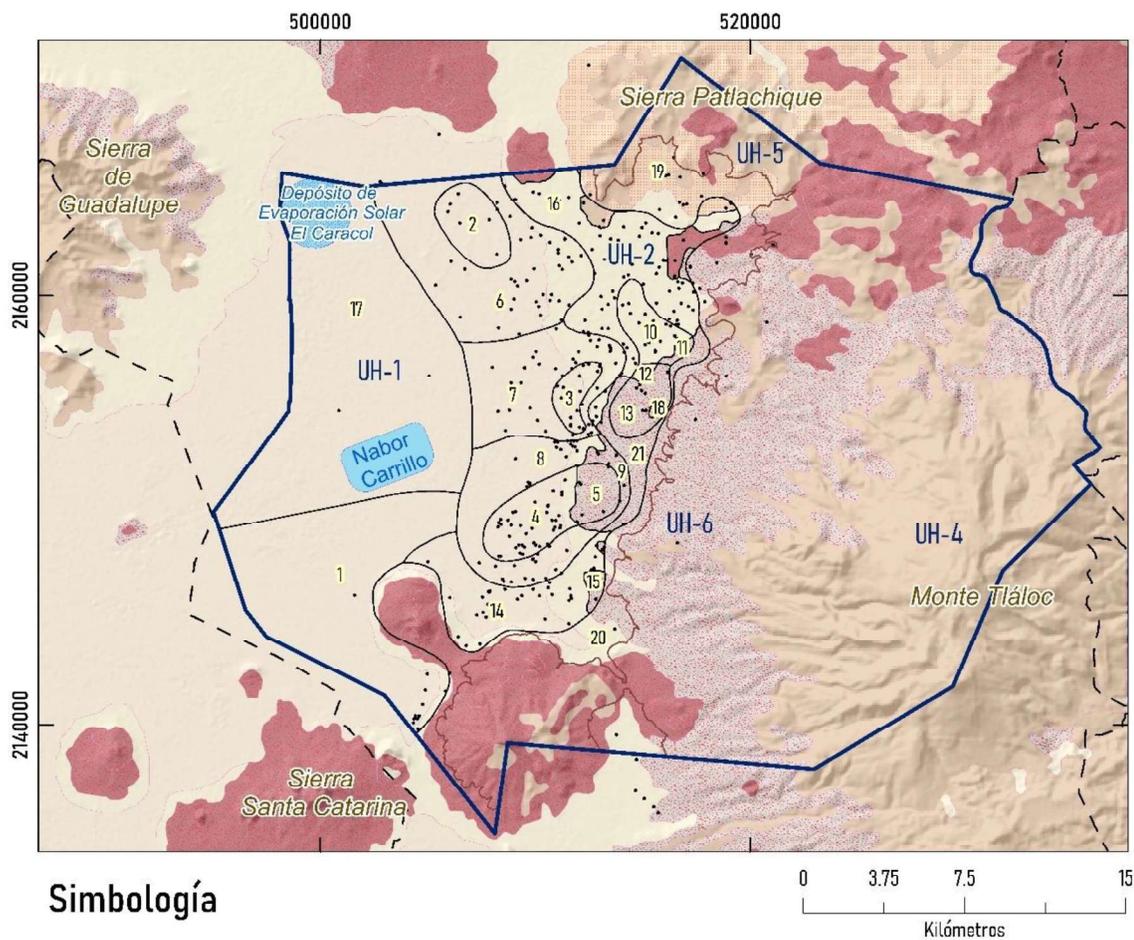


Figura 5.10. Evolución del nivel piezométrico en el acuífero Texcoco en el periodo 2006 – 2018



Simbología

- - - Límite estatal
- Acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Pozos de extracción
- Área de balance
- Polígono de evolución piezométrica

Figura 5.11. Polígonos de evolución piezométrica para el periodo 2006 – 2018.

Tabla 5.7. Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo 2006 – 2018.

Polígono	Evolución del nivel piezométrico (m)	Área del polígono (m ²)	Abatimiento (S) (m)	Volumen de roca drenada (Vrd) (m ³)	Vrd anual (Vrd/12) (m ³)	Sy	Cambio de almacenamiento (ΔS) (m ³)
1	9	64719974	-9	582479766	48539980.5	0.15	-7280997.07
2	18 a 15	9571943	-16.5	157937060	13161421.6	0.15	-1974213.24
3	12	4277607	-12	51331284	4277607	0.15	-641641.05
4	19 a 15	11894461	-17	202205837	16850486.4	0.15	-2527572.96
5	19 a 15	5107800	-17	86832600	7236050	0.20	-1447210
6	15 a 10	42507061	-12.5	531338263	44278188.5	0.15	-6641728.28
7	10 a 12	27132202	-11	298454222	24871185.2	0.15	-3730677.77
8	10 a 15	23600843	-12.5	295010538	24584211.5	0.15	-3687631.71
9	10 a 15	3252392	-12.5	40654900	3387908.33	0.20	-677581.66
10	10 a 12	6715668	-11	73872348	6156029	0.15	-923404.35
11	10 a 12	887025	-11	9757275	813106.25	0.20	-162621.25
12	20 a 10	680023	-15	10200345	850028.75	0.15	-127504.31
13	20 a 10	6164414	-15	92466210	7705517.5	0.20	-1541103.5
14	10 a 5	50555866	-7.5	379168995	31597416.3	0.15	-4739612.43
15	10 a 5	8887871	-7.5	66659032.5	5554919.38	0.20	-1110983.87

Tabla 5.7. Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo 2006 – 2018 (continuación).

Polígono	Evolución del nivel piezométrico (m)	Área del polígono (m ²)	Abatimiento (S) (m)	Volumen de roca drenada (Vrd) (m ³)	Vrd anual (Vrd/12) (m ³)	Sy	Cambio de almacenamiento (ΔS) (m ³)
16	10 a 5	12392700	-7.5	92945250	7745437.5	0.20	-1549087.5
17	10	113472200	-10	1134722000	94560166.7	0.15	-14184025
18	20 a 21	372702	-20.5	7640391	636699.25	0.20	-127339.85
19	0 a 5	12729141	-2.5	31822852.5	2651904.38	0.15	-397785.65
20	0 a 5	35886699	-2.5	89716747.5	7476395.63	0.20	-1495279.12
21	0 a 5	14161738	-2.5	35404345	2950362.08	0.20	-590072.41
						Σ	-55558073.05
						hm³/año	-55.55

5.4.4. Cálculo de la recarga vertical del acuífero

Debido a que se contó con información para calcular el cambio de almacenamiento, el volumen de entrada y salida por flujos subterráneos y se conoce el volumen de recarga inducida, así como el volumen de extracción a partir del censo de aprovechamientos del año 2006, aplicando la ecuación de balance (ecuación 4.7), para el acuífero Texcoco se obtuvo un volumen de recarga vertical de 70.02 hm³/año.

$$Rv = 173.33 + 0.73 - 5.26 - 43.23 - 55.55$$
$$Rv = 70.02 \text{ hm}^3 \quad (4.7)$$

5.4.5. Recarga total del acuífero

Finalmente, la recarga total que recibe el acuífero Texcoco para el periodo 2006 – 2018 en la superficie de balance establecida (455 km²), se obtuvo de la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, como se estableció en la ecuación 4.8, por lo que se estima una recarga total de 118.51 hm³.

$$Rt = 43.23 + 70.02 + 5.26$$
$$Rt = 118.51 \text{ hm}^3 \quad (4.8)$$

5.5. Estimación de la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo

La recarga potencial del acuífero Texcoco se obtuvo mediante la aplicación del balance hídrico del suelo en una superficie de 933.66 km², la cual corresponde al área total del acuífero y en un periodo de 1980 al 2018.

5.5.1. Precipitación

Una vez procesadas las superficies de precipitación proporcionadas por Daymet se calculó la precipitación media anual en el acuífero Texcoco para el periodo 1980 – 2018 (figura 5.12) en el que se observa que los mayores eventos de precipitación ocurren al este del acuífero, es decir en la cima del Monte Tlaloc, con precipitaciones entre 920 a 1 125 mm anuales y en las estribaciones se presentan precipitaciones de 640 a 920 mm anuales, por el contrario, en la planicie del acuífero dónde se localizan los aprovechamientos subterráneos se presentan precipitaciones de menor magnitud, entre los 540 y 640 mm anuales.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

También, se observa un incremento en las precipitaciones del orden de los 640 a 760 mm anuales al oeste del acuífero, es decir hacia el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en las elevaciones aisladas como el cerro Chimalhuachi y El Pino, la magnitud de estos eventos son cercanos a los que ocurren en las estribaciones del Monte Tlaloc.

De manera temporal, los mayores eventos de precipitación ocurren en los meses de junio a septiembre es decir durante el verano, donde ocurren precipitaciones mayores a 110 mm, los meses más secos corresponden de noviembre a marzo, donde la precipitación no supera los 15 mm. En la tabla 5.8 se muestran los valores de precipitación en el área de estudio y en la figura 5.13 su comportamiento a lo largo del año. Dicho lo anterior, la precipitación media anual del acuífero Texcoco corresponde a 648.3 mm al año es decir 638.9 hm³ al año.

Tabla 5.8. Precipitación media anual en el acuífero Texcoco.

Meses	Precipitación media (mm)
enero	8.3
febrero	8.8
marzo	14.1
abril	27.5
mayo	52.8
junio	127.5
julio	129.9
agosto	126.5
septiembre	118.1
octubre	53.4
noviembre	13.1
diciembre	4.2
anual	648.3

Elaborado con datos de Daymet, 2021.

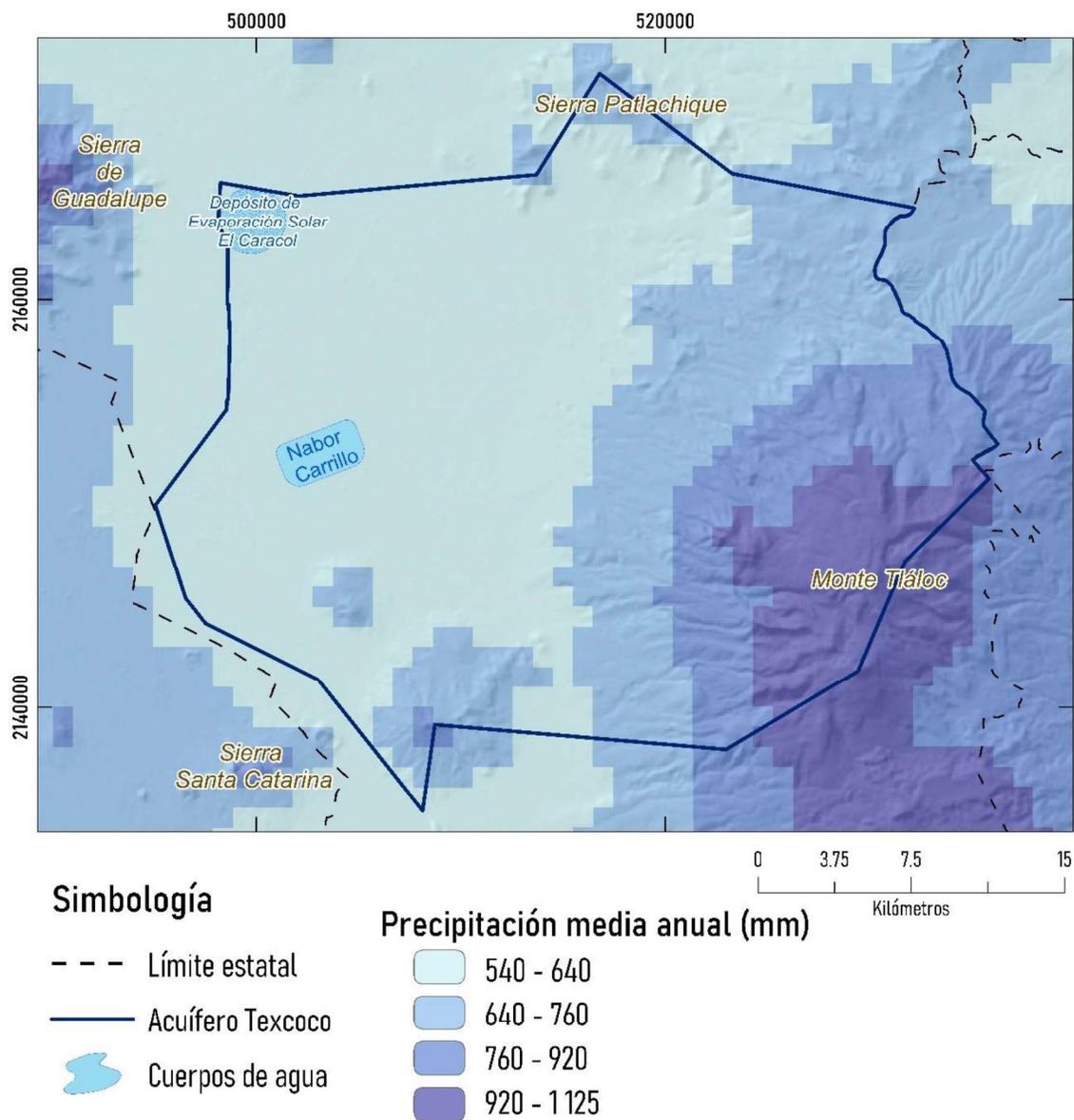


Figura 5.12. Precipitación media anual en el acuífero Texcoco para el periodo 1980 – 2018 (elaborado con datos de Daymet, 2021).

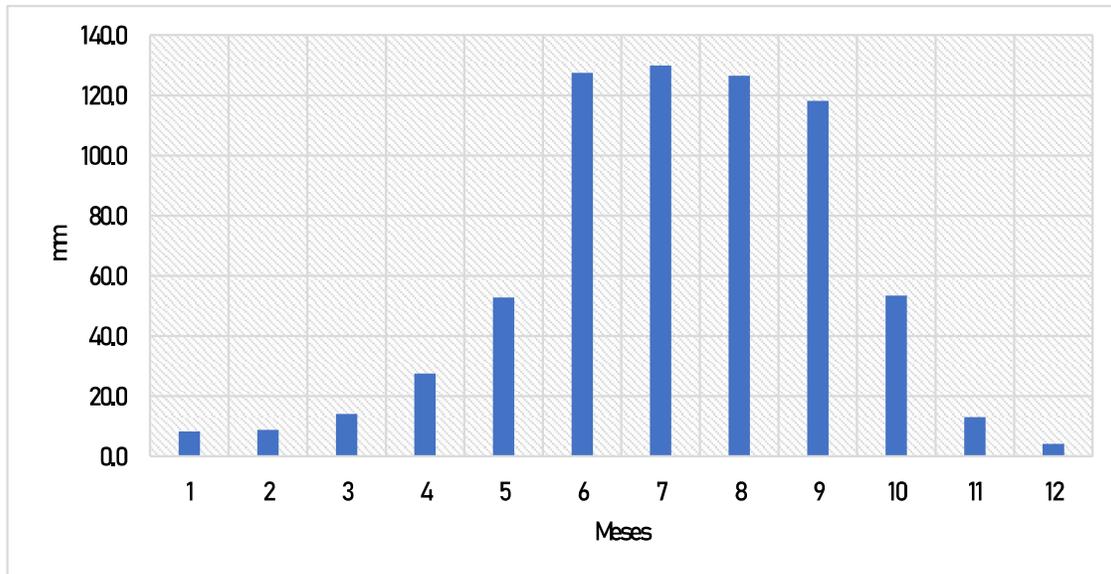


Figura 5.13. Comportamiento de la precipitación a escala mensual en el acuífero Texcoco (elaborado con datos de Daymet, 2021).

5.5.2. Evapotranspiración real

La distribución de la ET_A en el acuífero para el periodo 2003 - 2018 se muestra en la figura 5.13, y se observa que en las laderas del Monte Tlaloc se presentan los mayores de ET_A , en un orden de 647 a 1 200 mm al año, siendo aquí donde se presentan los mayores eventos de precipitación, y la cobertura del suelo corresponde a bosque y vegetación densa. Los valores medios de ET_A se encuentran entre la planicie y las estribaciones de la Sierra Patlachique al norte del acuífero y el Monte Tlaloc en dirección este, con valores de ET_A de 215 a 398 mm al año.

Los menores valores de ET_A se presentan en la planicie del acuífero y corresponden a la zona urbana del acuífero Texcoco, así como del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Hay que mencionar que el modelo SSEBop hace uso de información de cobertura del suelo por lo que la ET_A está influenciado por la presencia de la zona urbana. En la tabla 5.9 se muestran los valores mensuales de ET_A y en la figura 5.14 se muestra su distribución en el tiempo con relación a la temperatura media del área de estudio y la precipitación media anual,

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

dónde se observa que los mayores valores de ET_A se presentan en los meses de agosto a octubre en los que la temperatura media supera los 15°C y la precipitación es superior a los 115 mm.

Además, se observa que los meses de diciembre a marzo la ET_A supera a la precipitación, esto puede deberse a la humedad que se encontraba en el suelo o la vegetación producto de eventos máximos de precipitación acontecidos en el acuífero. La menor ET_A ocurre en el mes de diciembre siendo este el mes más seco del año y también uno de los más fríos, superado solo por enero donde la temperatura media es de solo 11.6°C .

Dicho lo anterior, la ET_A media anual del acuífero Texcoco es de 309.6 mm al año, es decir 289.1 hm^3 al año, los que indica que del 100% de la precipitación en el acuífero Texcoco, el 45.24% se descarga por evapotranspiración real.

Tabla 5.9. Evapotranspiración real (ET_A) en el acuífero Texcoco.

Mes	T Media ($^{\circ}\text{C}$)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración real (mm)
enero	11.6	8.3	8.3
febrero	13.0	8.8	11.4
marzo	14.8	14.1	19.6
abril	16.4	27.5	24.6
mayo	17.0	52.8	31.3
junio	16.4	127.5	32.4
julio	15.6	129.9	45.1
agosto	15.6	126.5	48.2
septiembre	15.4	118.1	40.0
octubre	14.4	53.4	28.0
noviembre	12.3	13.1	12.6
diciembre	12.0	4.2	8.0
anual		648.3	309.6

Elaborado con datos de Daymet, NASA y USGS, 2021.

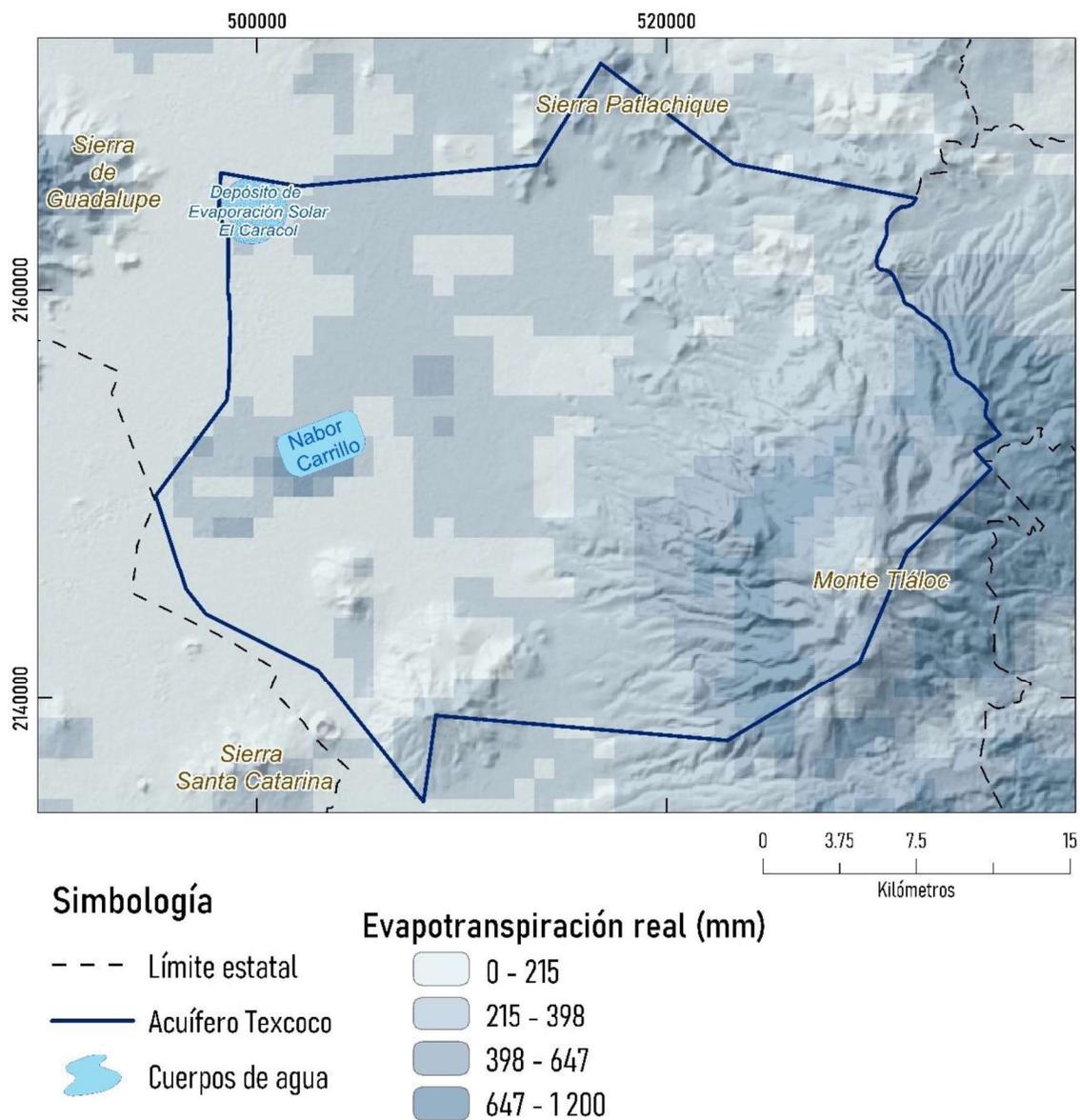


Figura 5.14. Evapotranspiración real (ET_A) en el acuífero Texcoco para el periodo 2003 – 2018. (elaborado con datos de NASA y USGS, 2021).

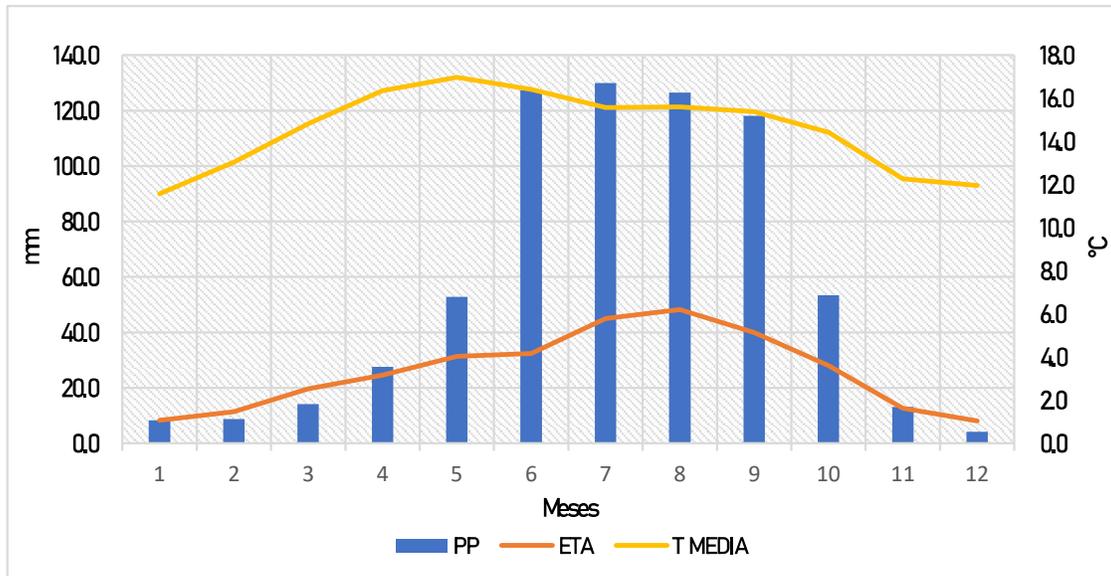


Figura 5.15. Comportamiento a escala mensual de la evapotranspiración real (ET_A), precipitación y temperatura media en el acuífero Texcoco.

5.5.3. Esguerrimiento superficial

Con base en Benítez et al., (1980) se asignaron valores a los diferentes factores para estimar el C_e , como se describe a continuación:

1. Tipo de suelo: una vez realizada la clasificación de la textura del suelo en función de la permeabilidad se obtuvo la cartografía que se presenta en la figura 5.16. Los suelos permeables se localizan en la porción este y sureste del acuífero, hacia el Monte Tlaloc y la Sierra Santa Catarina y los suelos semipermeables se encuentran al centro del acuífero y se distribuyen hacia el noreste en la Sierra Patlachique. Finalmente, los suelos impermeables se localizan en la planicie del acuífero, coincidiendo con la zona lacustre y donde se presentan las condiciones de confinamiento del acuífero.

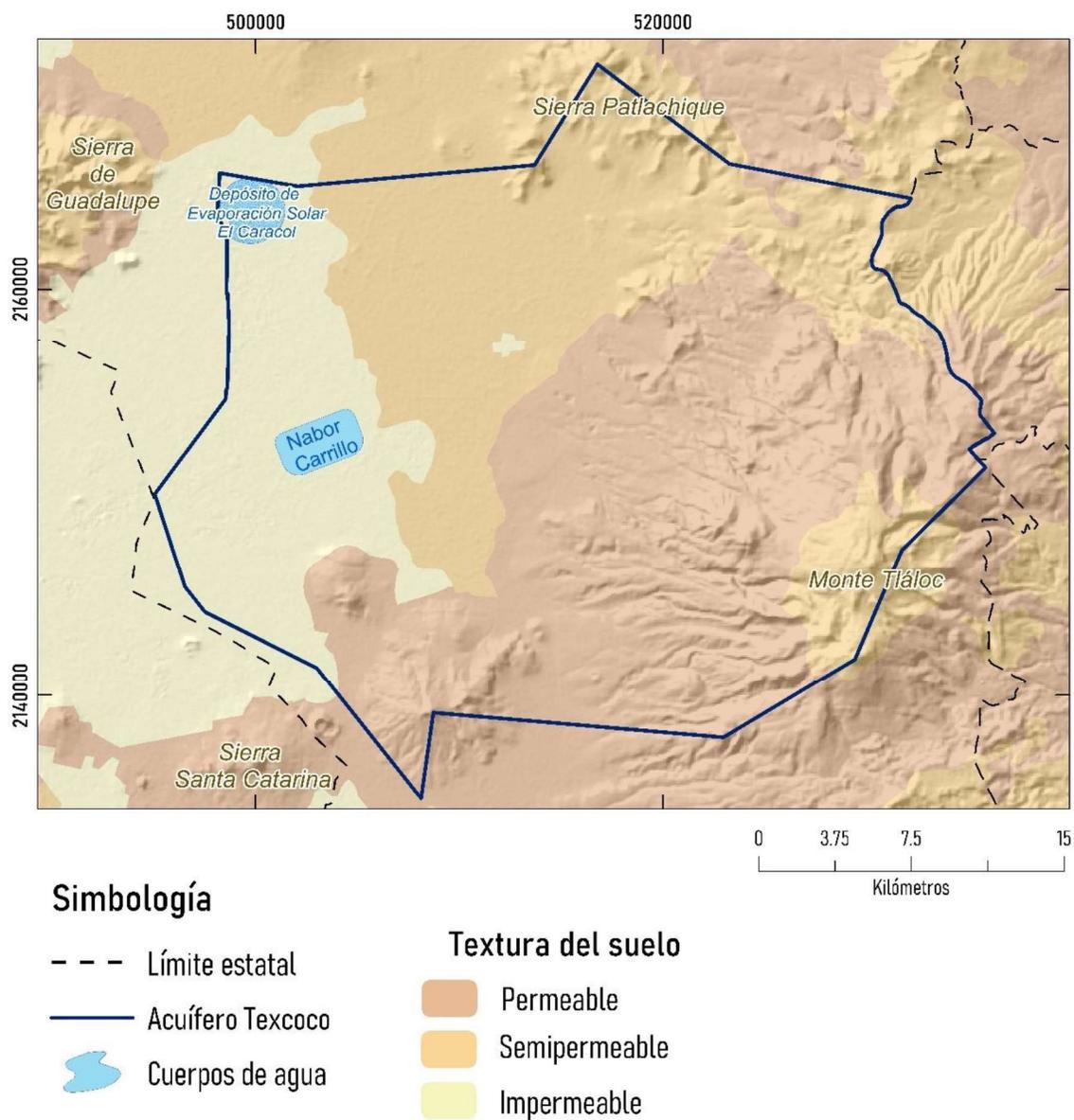


Figura 5.16. Clasificación del suelo con base en su permeabilidad en el acuífero Texcoco.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

2. Cobertura del suelo: en la figura 5.17 se observa la nueva clasificación de la cobertura del suelo de acuerdo con lo establecido por Benítez et al., 1980. Se aprecia que el bosque y vegetación densa corresponde a las zonas montañosas, en el Monte Tlaloc, mientras que en la porción centro y noreste del acuífero se distribuye en mayor parte los cultivos y hacia el oeste del acuífero se identifican extensas áreas de suelo sin vegetación, el cual como ya se mencionaba corresponde a la zona urbana y algunas áreas desprovistas de vegetación al sur del Lago Nabor Carrillo y el Evaporador Solar “El Caracol”.

3. Pendiente: en la figura 5.18 se observa la clasificación de la pendiente del terreno. Las pendientes mayores a 50 % se encuentran en la porción este de la poligonal del acuífero, en las elevaciones como el Monte Tlaloc, al sur en el cerro El Pino y la Sierra Santa Catarina y al norte en la Sierra Patlachique, mientras que la porción oeste se caracteriza por ser una región con pendiente en un porcentaje de 0 a 5%.

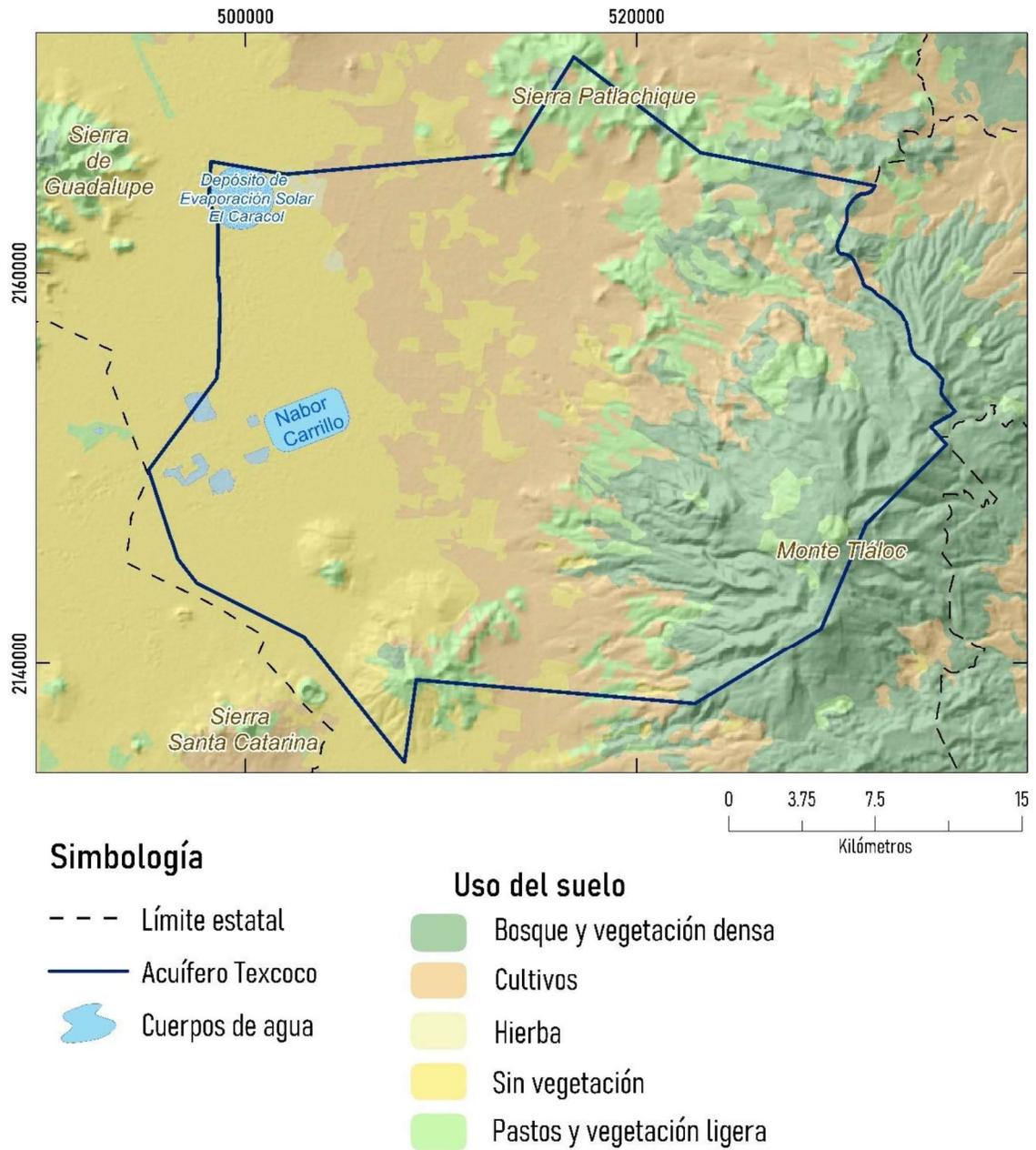


Figura 5.17. Cobertura del suelo en el acuífero Texcoco en el año 2016 clasificada en función de Benítez et al., 1980.

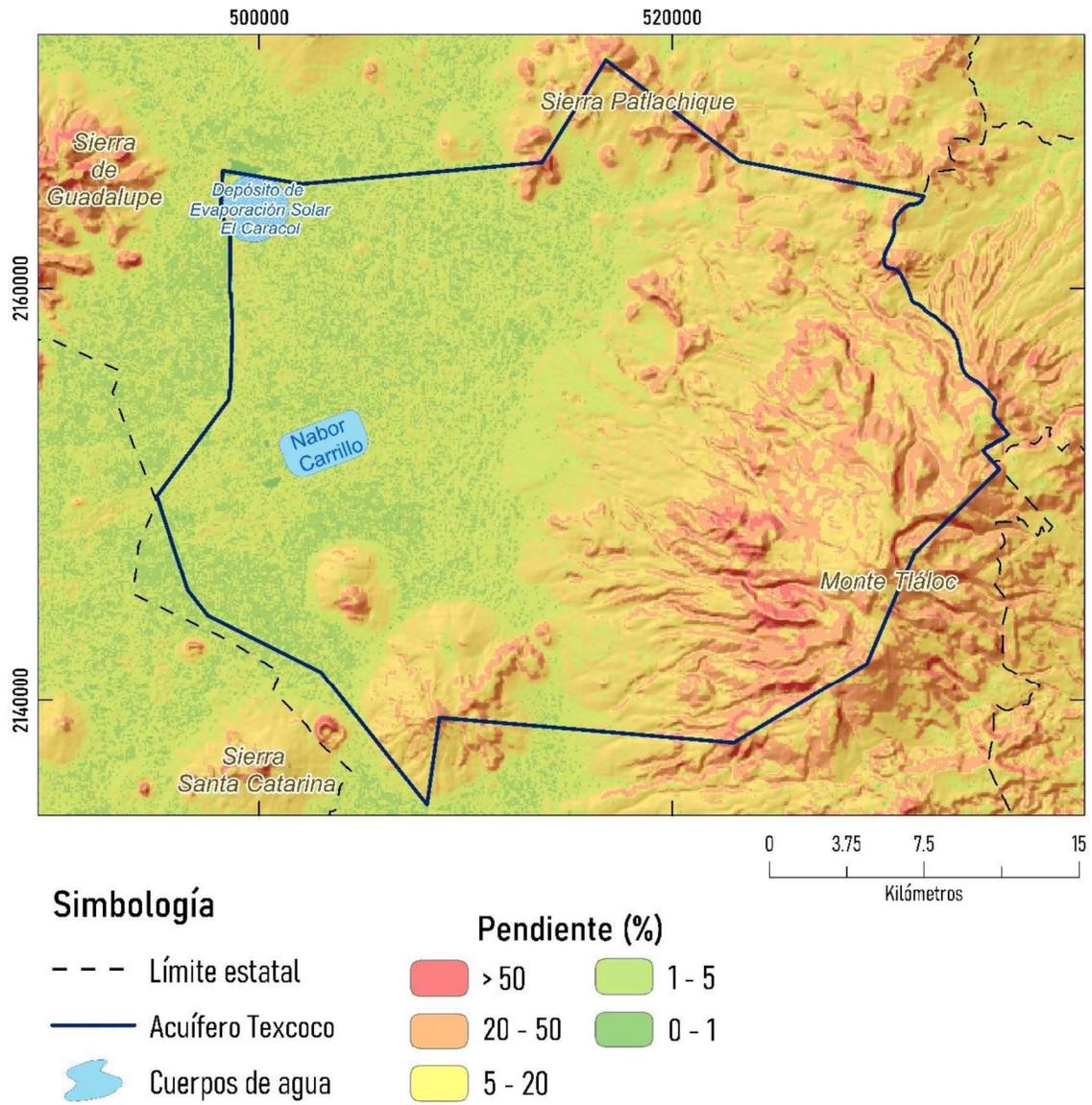


Figura 5.18. Pendiente del terreno en el área de estudio clasificada en función de Benítez et al., 1980.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

El C_e en el área de estudio se observa en la figura 5.19. En la porción oeste del acuífero, es decir la planicie lacustre el C_e corresponde a 0.8 de acuerdo con la modificación realizada. Los valores medios de C_e se distribuyen en el centro y hacia el norte del acuífero, fuertemente influenciados por la textura del suelo clasificada como “semipermeable” y la cobertura del suelo que corresponde a “cultivos”. Los menores valores de C_e se presentan en la porción este del acuífero, aunque es la porción con mayor pendiente el C_e esta influenciado por la textura del suelo “permeable” y a una cobertura del suelo que en su mayoría es “bosque y vegetación densa”.

Una vez establecido el C_e del área de estudio, el escurrimiento superficial estimado permite apreciar que éste es mayor en la porción oeste del acuífero (figura 5.20), en la planicie lacustre varía de los 450 a 600 mm/año, observándose hacia el acuífero de la Ciudad de México el escurrimiento tiene un incremento hasta los 700 mm/año; mientras que en la porción este se presenta el menor escurrimiento con valores de 150 a 300 mm/año, y en la zona central el escurrimiento es de 300 a 450 mm/año. En la tabla 5.10 y en la figura 5.21 se muestran los valores de escurrimiento mensual. Dicho lo anterior, el escurrimiento superficial del área de estudio es de 291 mm al año, es decir 271.7 hm^3 al año, los que indica que del 100% de la precipitación en el acuífero Texcoco, el 42.5% escurre de forma superficial.

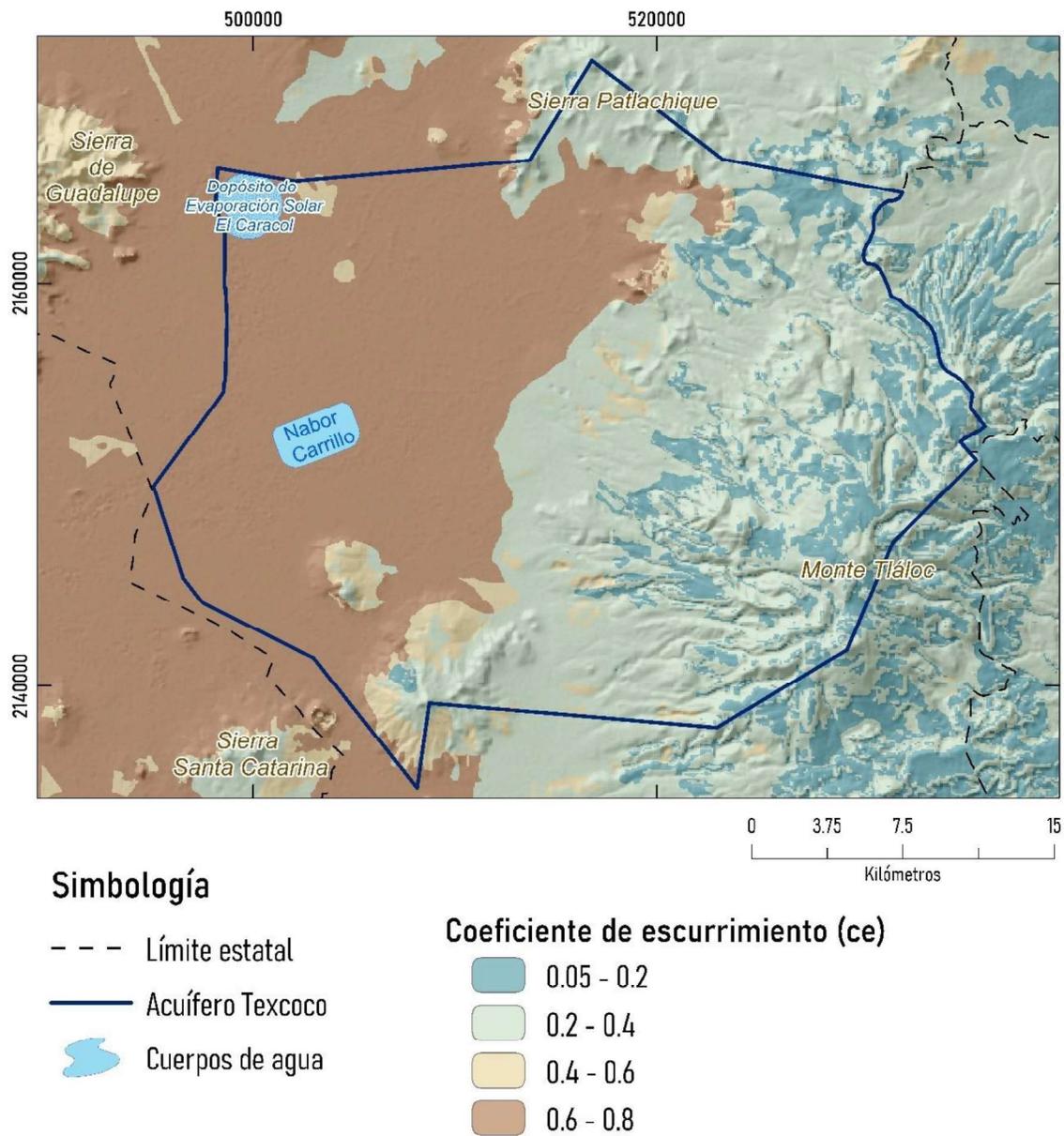


Figura 5.19. Valores del coeficiente de escurrimiento (C_e) del área de estudio en función de Benítez., et al., 1980.

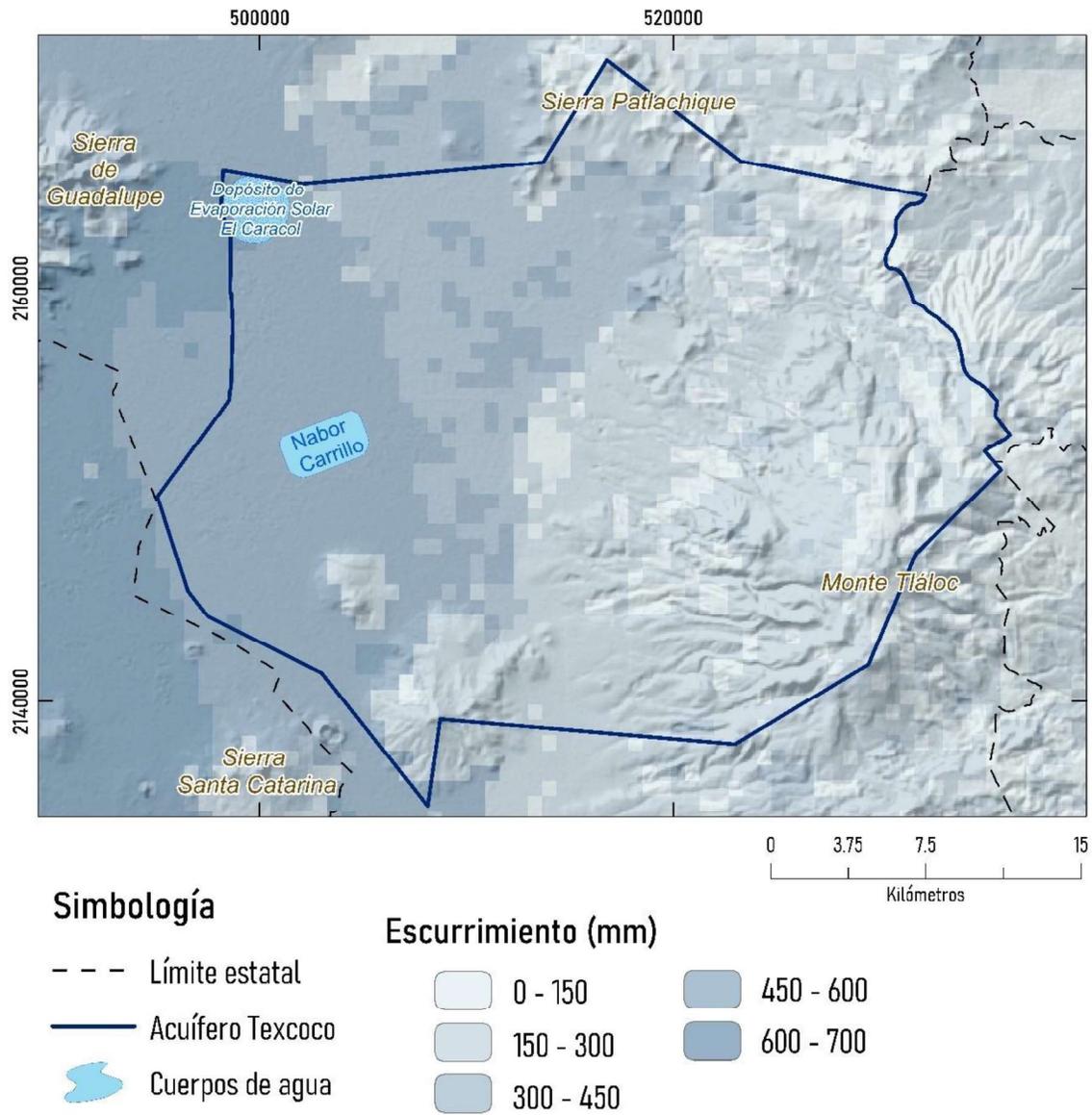


Figura 5.20. Escurrimiento superficial en el área de estudio.

Tabla 5.10. Escurrimiento superficial en el acuífero Texcoco.

Meses	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)
enero	8.3	3.3
febrero	8.8	3.5
marzo	14.1	5.6
abril	27.5	11.4
mayo	52.8	21.7
junio	127.5	54.2
julio	129.9	56.4
agosto	126.5	54.5
septiembre	118.1	50.1
octubre	53.4	22.8
noviembre	13.1	5.6
diciembre	4.2	1.8
anual	684.3	232.5

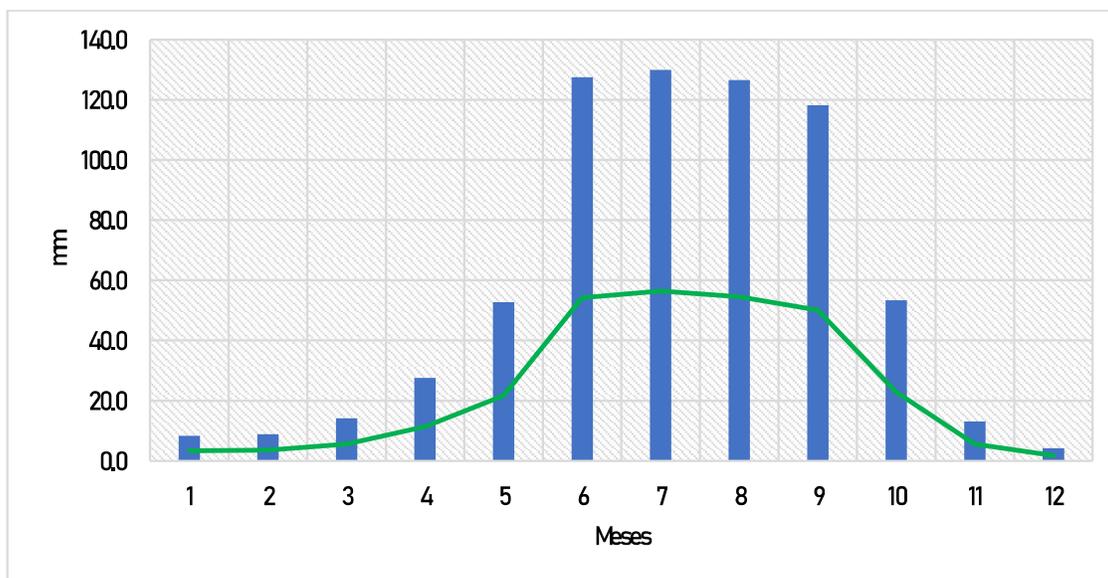


Figura 5.21. Comportamiento a escala mensual del escurrimiento superficial y la precipitación media anual en el acuífero Texcoco.

5.5.5. Infiltración

De acuerdo con la ecuación de balance hídrico del suelo, la infiltración total media anual del acuífero Texcoco para el periodo 1980 – 2018 es de 123.7 mm/año, es decir 115.4 hm³/año. De forma espacial, en la figura 5.22 se observa que en la cima del Monte Tlaloc se presenta una infiltración mayor a los 450 mm al año, siendo en las laderas y la cima del cerro El Pino donde la infiltración varía de los 300 a 450 mm/año, en estas áreas predomina la vegetación densa, una textura del suelo permeable y además los eventos de precipitación superan los 900 mm/año. En áreas de menor elevación como la Sierra Patlachique, las estribaciones del Monte Tlaloc y las laderas del cerro El Pino se presenta una infiltración entre 150 a 300 mm/año, en esta área predominan los cultivos y áreas clasificadas como hierba, así como una textura del suelo clasificado como permeable.

Por otra parte, ocurre una menor infiltración en la porción oeste del acuífero, en la planicie lacustre del Ex Lago de Texcoco donde la infiltración es inferior a los 80 mm/año, incluso en áreas cercanas al lago Labor Carrillo y el evaporador solar El Caracol la infiltración es nula debido a que el suelo de esta área es impermeable por la presencia del material arcilloso que hidrogeológicamente se comporta como un acuitardo.

La infiltración tiene un comportamiento estacional, coincidiendo con la temporada de lluvias y disminuyendo o siendo nulo en la temporada de estiaje. En la tabla 5.11 y la figura 5.23 se observa que en los meses de mayo a octubre el volumen de la precipitación que no se evapotranspira o escurre se puede infiltrar en el suelo y convertirse en recarga, siendo el mes de junio cuando se presenta un mayor volumen de infiltración. En julio ocurre una disminución de la infiltración relacionada con el incremento considerable de la evapotranspiración y del escurrimiento superficial, el cual alcanza su máximo. Esta condición se repite en agosto, cuando la evapotranspiración alcanza su máximo y repercute en la disminución en la infiltración.

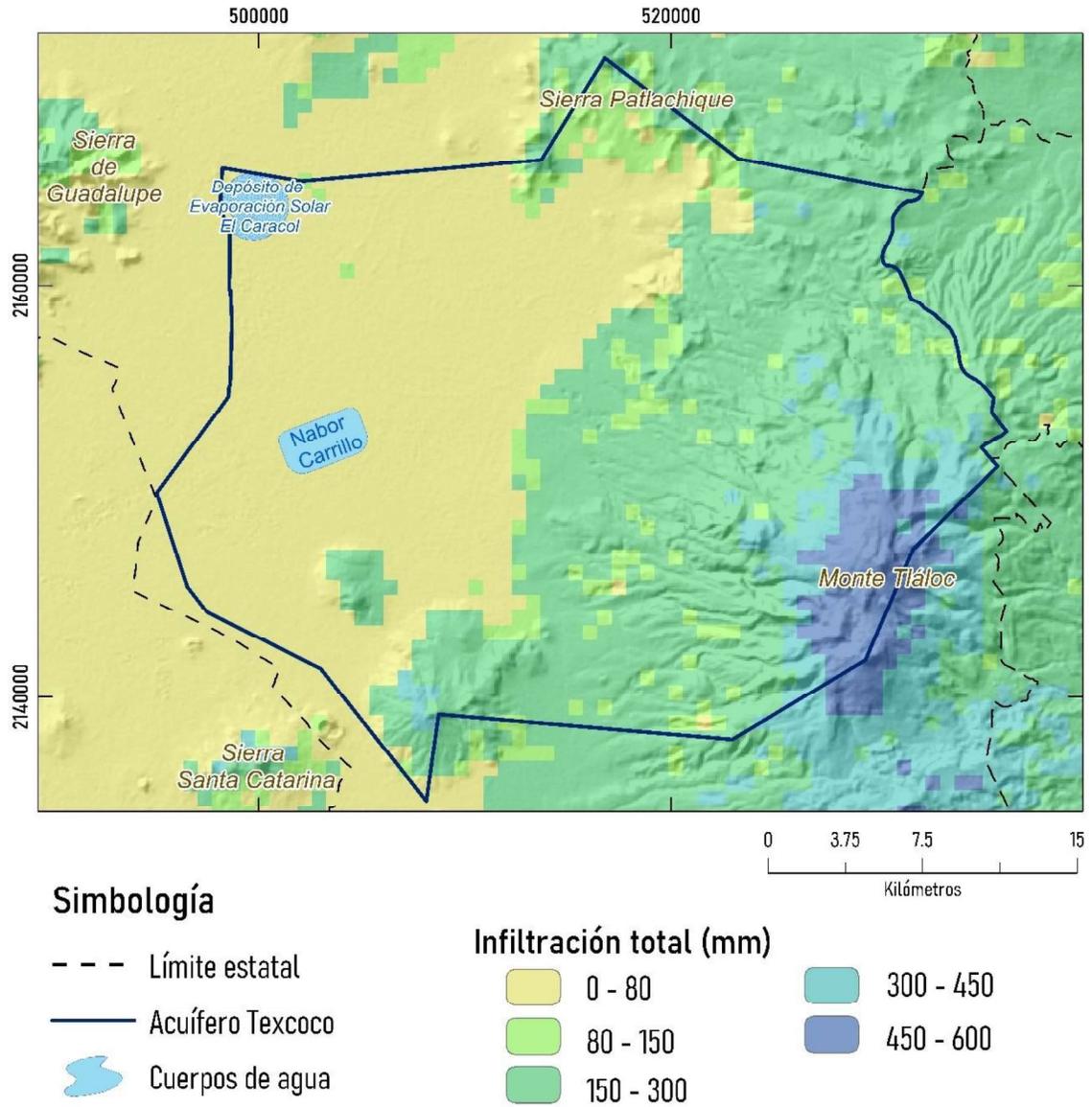


Figura 5.22. Infiltración total (recarga potencial) en el acuífero Texcoco, Estado de México.

Tabla 5.11. Balance hídrico del suelo en el acuífero Texcoco.

Mes	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrimento	Infiltración
enero	8.3	8.3	3.3	0
febrero	8.8	11.4	3.5	0
marzo	14.1	19.6	5.6	0
abril	27.5	24.6	11.4	0
mayo	52.8	31.3	21.7	0
junio	127.5	32.4	54.4	48.0
julio	129.9	45.1	56.4	28.4
agosto	126.5	48.2	54.5	23.8
septiembre	118.1	40.0	51.1	28
octubre	53.4	28.0	22.8	2.6
noviembre	13.1	12.6	5.6	0
diciembre	4.2	8.0	1.8	0
mm/año	684.3	309.6	291	123.7
hm ³ /año	639.2	289.2	271.8	115.5

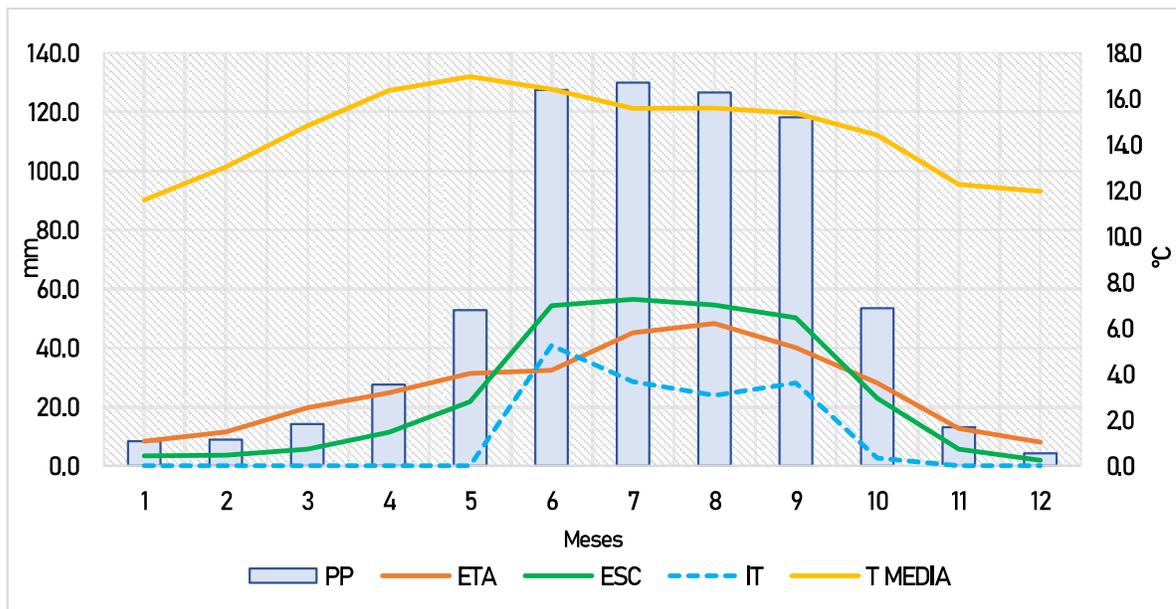


Figura 5.23. Comportamiento a escala mensual de las variables de la ecuación de balance hídrico del suelo en el acuífero Texcoco.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Al evaluar los resultados del balance hídrico del suelo con lo establecido en el modelo conceptual de recarga (figura 5.24) se encontró que en la porción oeste del acuífero, es decir en la unidad hidroestratigráfica UH-1 parece que existe una recarga potencial en el área del acuitardo de 80 mm/año, es decir 23 hm³/año, este volumen no se convertirá en recarga media anual, ya que la geología de la zona no saturada impide la infiltración de la precipitación en la planicie lacustre del Ex Lago de Texcoco, y de acuerdo con Suárez (2019), tiene una conductividad hidráulica de 5.5×10^{-9} m/s y un espesor medio de 80 m, incapaz de infiltrar ese volumen de agua anual proveniente de la precipitación.

La presencia de dicho volumen de agua en los meses de mayor precipitación se atribuye al agua que no escurre, ni se evapotranspira y por las características hidrogeológicas de la unidad UH-1 impermeable no se infiltra, pero permanece disponible para ser devuelta a la atmósfera, ya sea transpirado por la vegetación o evaporada por la energía solar. Esto se complementa con los resultados obtenidos en la evapotranspiración real (ET_A), la cual en los meses de enero a febrero es superior a la precipitación en el área de estudio.

Respecto a los resultados obtenidos en la unidad UH-1 se debe tener en cuenta que la CONAGUA (2014), ha establecido un coeficiente de infiltración del 2% para el subsuelo constituido, principalmente por las arcillas que conforman esta unidad hidroestratigráfica, sin embargo, los 80 mm/año, obtenidos por método de balance hídrico del suelo representan el 11% de la precipitación que ocurre en esta porción del acuífero. Esta es una de las limitantes del método, el cual no considera la geología de la zona no saturada.

Por otra parte, en la unidad hidroestratigráfica UH-2 que es la porción donde aflora el acuífero en superficie se obtuvo una recarga potencial es de 95 mm/año, es decir 8.5 hm³/año. La recarga en esta unidad se encuentra limitada dada la extracción por los aprovechamientos subterráneos, ya que, complementando esta estimación con la recarga total, la recarga vertical es de 70.02 hm³/año. Este volumen corresponde a la superficie establecida para el balance del acuífero, de la cual se desconoce el volumen aportado por la unidad UH-1 mediante goteo a la unidad UH-2, y de acuerdo con sus características debe ser menor al infiltrado de forma vertical en la porción que aflora en superficie la unidad UH-2.

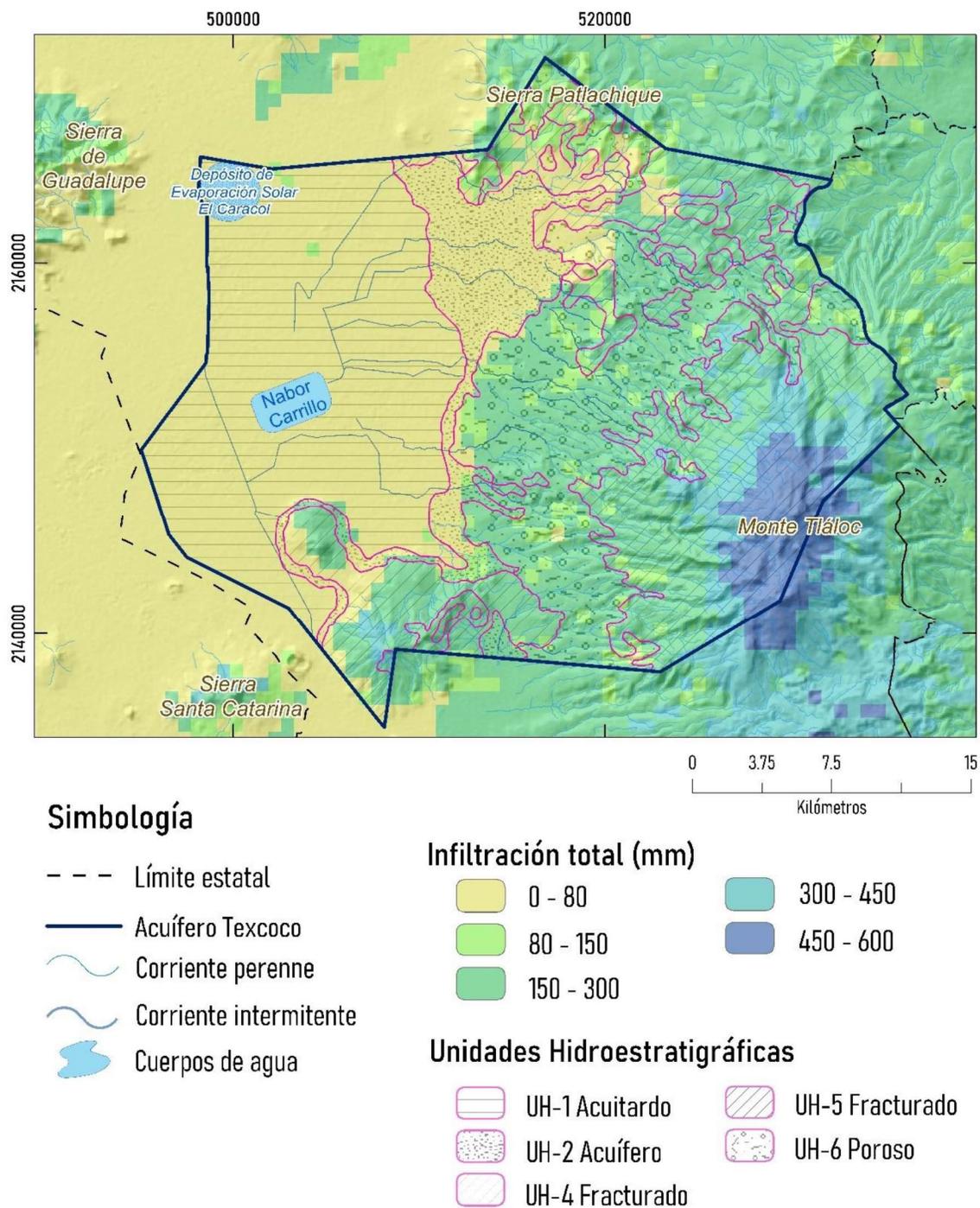


Figura 5.24. Evaluación de la recarga potencial considerando las unidades hidroestratigráficas.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Lo anterior, indica la presencia de otro origen de agua de infiltración, la cual no está contemplada directamente por el método de balance hídrico del suelo. De acuerdo con lo establecido en el modelo conceptual de recarga el origen de ese volumen faltante podría ser aportado por los escurrimientos (figura 5.24) de las zonas montañosas (unidades UH-4 y UH-6) que al llegar a la UH-2 se infiltran. Este punto es otra desventaja de este método de balance hídrico, pues no considera que parte del escurrimiento superficial puede infiltrarse en áreas donde las condiciones del terreno sean favorables.

En las unidades UH-4, UH-5 y UH-6 se obtuvo una recarga potencial de 150.02 mm/año, es decir 84 hm³/año, el cual, sumando al volumen de entrada por flujos subterráneos del método de balance hídrico del acuífero, que es de 43.23 hm³/año, permite estimar un que es suficiente para contribuir a las entradas por flujos subterráneos, así como sustentar el volumen de los manantiales que de acuerdo con el censo del 2006 es de 10.4 hm³/año. También permitirá sustentar los escurrimientos superficiales localizados en esta área y alimentar a los flujos profundos que se definen en la unidad UH-4.

Por otro lado, el método de balance hídrico del suelo fue capaz de identificar las regiones donde podría ocurrir una mayor infiltración, lo cual resulta útil para en el diseño e implementación de planes de protección de las zonas de recarga, favoreciendo al manejo sustentable del acuífero, que es una necesidad imperiosa debido a la situación de sobreexplotación en la que se encuentra el acuífero y dónde los efectos negativos derivados de esta condición son evidentes.

La aplicación del método de balance hídrico del suelo ha demostrado efectividad en las regiones donde la geología de la zona no saturada permite la infiltración de la precipitación. Sin embargo, como se mencionó, el método presenta limitantes en las unidades UH-1 y UH-2, las cuales se pueden aminorar con los resultados de la estimación de la recarga total mediante el método de balance hídrico del acuífero.

En la figura 5.25, se muestra un resumen de la recarga total y potencial en el modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco.

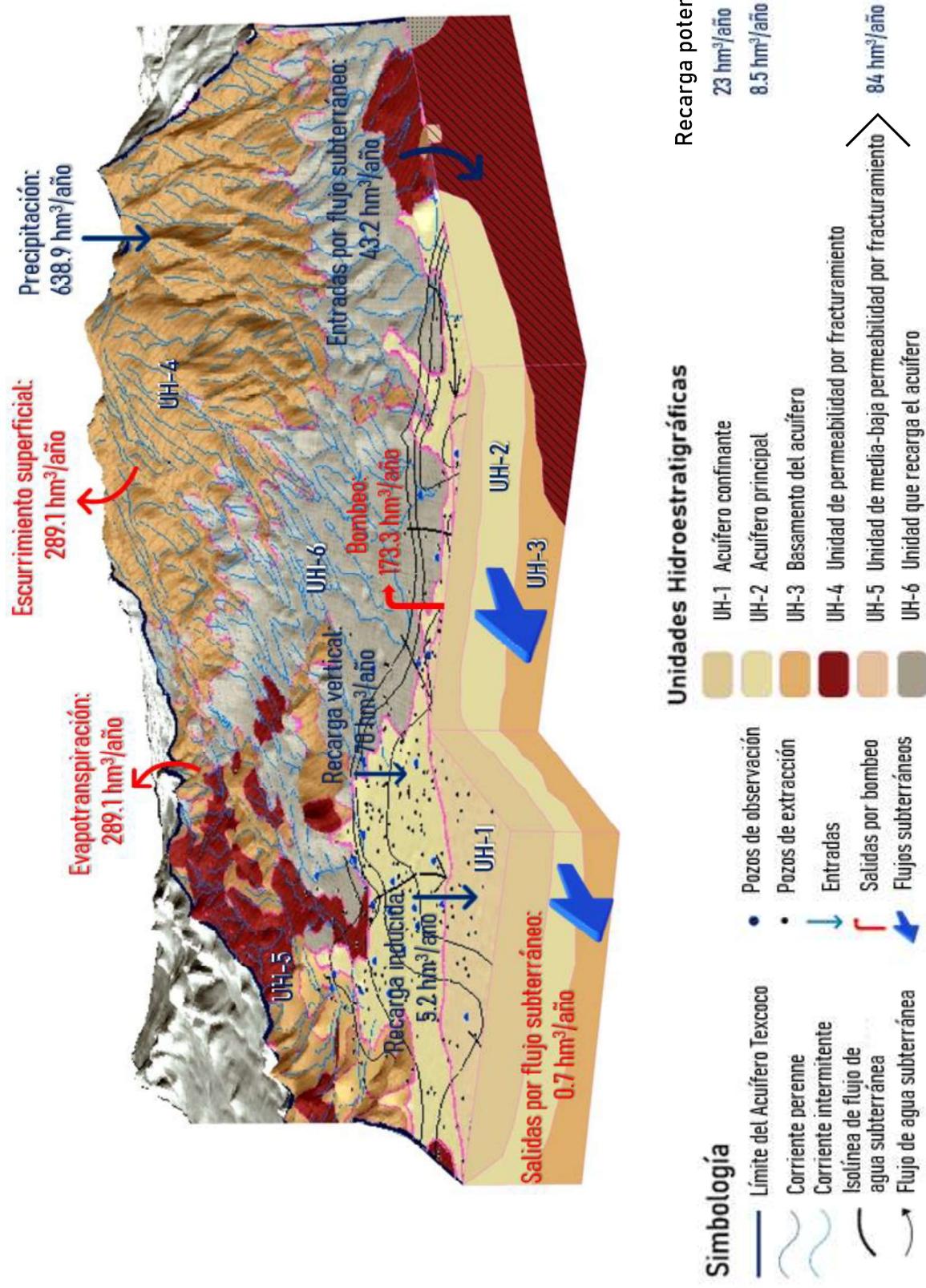


Figura 5.25. Modelo conceptual de recarga del acuífero Texcoco con los resultados de la estimación de la recarga.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Un punto que resaltar en cuanto a la recarga potencial por el método de balance hídrico del suelo, se destaca la implementación de las superficies de precipitación proporcionadas por Daymet, las cuales fueron una opción confiable frente a la utilización de datos de estaciones climáticas las cuales la mayoría de las veces presentan datos incompletos, así como irregularidades en las mediciones. *Daymet: resúmenes climatológicos mensuales en una cuadrícula de 1 km para América del Norte, versión 4* tiene disponible información de precipitación histórica del área de estudio y con las superficies de precipitación en el software de SIG fue posible analizar, realizar gráficos y operaciones aritméticas, así como extraer valores numéricos de áreas específicas.

En referencia a las superficies de evapotranspiración real brindadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la NASA, presentan una ventaja frente a los métodos empíricos que en su mayoría calculan la evapotranspiración potencial o anual, seguido por el método de Penman-Monteith recomendado por la FAO, el cual requiere información de estaciones climatológicas sofisticadas o parámetros difíciles de obtener.

De acuerdo con Custodio, (2019), la evaporación y transpiración (evapotranspiración) son fenómenos principalmente energéticos y las superficies proporcionadas por la USGS y la NASA se calcularon mediante un modelo operacional de balance energético simplificado, además de complementarlo con información de cobertura del suelo, lo anterior expone que la utilización de estas superficies fue adecuada.

En otro orden de ideas, el escurrimiento superficial podría ser la variable con mayor incertidumbre, debido a la falta de información en estaciones hidrométricas en el área de estudio, es por ello por lo que se recurrió a calcular el coeficiente de escurrimiento (C_e) con la metodología establecida por Benítez et al., (1980), en el que fue conveniente modificar los valores para la porción oeste del acuífero, con la finalidad de obtener un C_e representativo. En el mejor de los casos lo ideal sería realizar una validación del escurrimiento superficial, pero esto podría ser complicado debido a que la mayoría de los escurrimientos actualmente se han convertido en drenajes y sería imposible calcular un escurrimiento natural. Sin embargo, no se retira la posibilidad de implementar otros métodos empíricos en el cálculo del coeficiente de escurrimiento como el establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015, así como el uso imágenes satelitales en clasificación de la cobertura del suelo.

5.6. Discusión de los resultados obtenidos con base en investigaciones previas

La comparación de los resultados obtenidos con los estudios previos orientados a la estimación de la recarga en el acuífero Texcoco, mostraron diferencias en los volúmenes estimados, por ejemplo, el estudio más antiguo de la CONAGUA (2002), reporta una recarga total de 48.6 hm³/año la cual proviene directamente de las entradas por flujo subterráneo del cual se desconocen la ubicación y dimensiones de las celdas, así como los parámetros hidrodinámicos de las unidades hidroestratigráficas.

En el estudio de la CONAGUA, (2006), se reportan una recarga total de 85 hm³/año para el año 1990 y 99.8 hm³/año para el 2006, seguido por el año 2007 con una recarga total de 82.6 hm³/año y en el estudio del 2009 en un trabajo colaborativo con la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) se reporta una recarga de 103.1 hm³/año. Se considera que los resultados obtenidos en la presente investigación están alejados a los anteriormente mencionados, principalmente, porque en los estudios del 2006, 2007 y 2009 la recarga vertical fue estimada mediante el coeficiente de infiltración el cual se obtiene mediante el cociente del volumen infiltrado y el volumen precipitado, a diferencia que en la presente investigación la recarga vertical fue el último insumo en estimar al despejarse de la ecuación general de balance.

Otro aspecto de dichos estudios es que la recarga inducida también fue obtenida mediante diferentes coeficientes de infiltración que varían de 0.25 a 0.30, por su parte el estudio del 2009 considera coeficientes de pérdida en función de los diferentes usos del agua. Con respecto a las entradas por flujo subterráneo, en todos los estudios se utilizaron los mismos valores de transmisividad (0.001 m²/s) sin especificar la unidad hidroestratigráfica a la pertenece dicho parámetro.

En el trabajo de Escobar (2010), se obtuvo una recarga total del acuífero de 124.80 hm³/año, Escobar retoma los volúmenes de entradas por flujo subterráneo y de infiltración reportados por la CONAGUA y la UACH en el 2009. En este estudio se apreció una pequeña diferencia en la recarga inducida, ya que fue estimada mediante la aplicación de coeficientes de pérdida para el uso público urbano y para el riego. El cálculo del cambio de almacenamiento del acuífero es la variable con la que se puede comparar esta investigación, ya que se obtuvo mediante la evolución del nivel piezométrico y el coeficiente de almacenamiento (Sy), Escobar obtuvo un cambio de almacenamiento de -67.61 hm³/año, sin embargo, se desconoce

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

la distribución del abatimiento del nivel piezométrico y hay una gran incertidumbre en la utilización de un coeficiente de almacenamiento (S_y) del 6%.

La CONAGUA (2014), obtuvo una recarga total de $145.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ de los cuales $38.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ provienen de entradas por flujo subterráneo, destacando que en este estudio se implementaron diferentes valores de transmisividad (T) establecidos de acuerdo con las propiedades en las unidades hidroestratigráficas, obteniendo un volumen de $43.23 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Por otro lado, el volumen reportado como recarga inducida de $5.3 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este valor fue retomado en la presente investigación, ya que no se contó con información sobre distritos de riego y en el acuífero, y comparando los estudios realizados, se determinó que considerar un coeficiente de infiltración del 2% para las arcillas que conforman al acuitardo (unidad UH-1), ya que ello es coherente con las propiedades hidrodinámicas de esta unidad, además de que el 94.7% de la zona urbana se localiza sobre el acuitardo, así como gran parte de los cultivos.

Igualmente, la recarga vertical se calculó al despejarse de la ecuación general de balance y en el estudio de la CONAGUA (2014), se obtuvo un volumen de $101.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. Sin embargo, en su ecuación de balance incluyeron las descargas por manantiales, y en el presente estudio no, ya que se localizan fuera del área de balance, por lo que se estimó una recarga vertical menor, de $70.02 \text{ hm}^3/\text{año}$.

El cambio de almacenamiento se determinó mediante la evolución piezométrica, sin embargo los valores promedio del coeficiente de almacenamiento (S_y) implementados por la CONAGUA (2014), contemplan al acuitardo (unidad UH-1) y en el presente estudio no, ya que la profundidad del nivel piezométrico se encuentra por debajo del acuitardo el cual tiene un espesor promedio de 80 m. Finalmente en CONAGUA (2014) se señala un cambio de almacenamiento de $-45 \text{ hm}^3/\text{año}$ en una superficie de balance de 700 km^2 y en el presente estudio de $-55.55 \text{ hm}^3/\text{año}$ en una superficie de balance de 455 km^2 .

En años más recientes, Suárez (2019), estimó la recarga en una superficie de balance de 554.38 km^2 . Para obtener la recarga vertical empleó diferentes coeficientes de infiltración de acuerdo con las características de las unidades hidroestratigráficas, dejando a la unidad UH-1 completamente impermeable, con lo cual obtuvo una recarga vertical de $23.88 \text{ hm}^3/\text{año}$ a

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

través de las unidades UH-2, UH-4, UH-5 Y UH-6; por otro lado, como entradas por flujo subterráneo mediante 11 celdas obtuvo un valor de $74.15 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los cuales $40.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ corresponden a 3 celdas provenientes del acuífero de la Ciudad de México y $33.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ de la porción oeste del acuífero.

A diferencia de Suárez, en el presente estudio no se consideraron entradas provenientes del acuífero de la Ciudad de México, pero si se consideró una celda de salida, sin embargo, el volumen de entrada por flujo subterráneo de las celdas en la porción oeste del acuífero estimado por Suárez (2019), es coherente con las obtenidas en esta investigación. Finalmente, Suárez no estimó la recarga inducida, ya que declaró a la unidad UH-1 como completamente impermeable y de esta forma estimó una recarga total de $98 \text{ hm}^3/\text{año}$, valor claramente lejano a los $118.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, obtenidos mediante el balance hídrico del acuífero en el presente estudio.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Finalmente, en este capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegó a partir del cumplimiento de los objetivos específicos y de las etapas metodológicas establecidas, así como de la discusión de los resultados obtenidos en la estimación de la recarga total por el método de balance hídrico del acuífero y la recarga potencial por el balance hídrico del suelo en el acuífero Texcoco. Además, se dan a conocer algunas recomendaciones que podrían tener en cuenta los futuros trabajos de investigación sobre recarga de acuíferos.

6.1. Conclusiones

La búsqueda, procesamiento y análisis de la información disponible permitió la caracterización y comprensión del funcionamiento del acuífero, así como la integración y ensamble del modelo conceptual de recarga en el software de SIG ArcMap. El modelo es indispensable en cualquier estudio de carácter hidrogeológico, ya que permite la identificación de variables que influyen en el proceso de recarga, así como las unidades hidroestratigráficas, el régimen de flujo del agua subterránea y los mecanismos de descarga del sistema acuífero, todo esto facilitó la selección de los métodos para la estimación de la recarga.

La conceptualización de los procesos de recarga en el acuífero Texcoco permitió seleccionar la aplicación de los métodos de balance hídrico, debido a que se contó con información piezométrica, censos de extracción, precipitación, evapotranspiración, edafología, cobertura del suelo y resto de información con los que fue posible obtener otros componentes en las ecuaciones de balance.

Mediante la aplicación del balance hídrico del acuífero se obtuvo una recarga total de 118.51 hm³/año de agua en una superficie de balance de 455 km² y en la temporalidad del 2006 al 2018. De la recarga total 70.02 hm³/año provienen de forma vertical, 5.26 hm³/año de forma inducida por retornos de riego y por fugas en redes de abastecimiento y alcantarillado y 43.23 hm³/año mediante entradas por flujos subterráneos. Con información de los niveles piezométricos se obtuvo el valor del cambio de almacenamiento del acuífero, el cual fue de -55.55 hm³/año; sin embargo, se presentó una limitante debido a la falta de información y ausencia de pozos de observación en la porción oeste del acuífero en los límites administrativos con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

A través del método de balance hídrico del suelo, se estimaron 638.9 hm³/año de precipitación media anual, 289.1 hm³/año de evapotranspiración real, 271.8 hm³/año de escurrimiento y 115.5 hm³/año de infiltración, valores que son considerados como el volumen de agua que pudiese alcanzar el acuífero, es decir, la recarga potencial.

Todos los métodos de estimación de la recarga contienen errores de distinta naturaleza, sin embargo, una inadecuada identificación, representación u omisión de los procesos de recarga

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

en un acuífero tendrán como consecuencia una errada selección y aplicación en los métodos de estimación. Optar por diferentes variantes del método de balance hídrico en la estimación de la recarga en el AT disminuyó la incertidumbre en los resultados, todo esto con apoyo de la interpretación con lo establecido en el modelo conceptual de recarga.

El método de balance hídrico del acuífero presenta algunas desventajas frente al método de balance hídrico del suelo, debido a que no tiene una distribución espacial de la recarga, y además desprecia a la región montañosa como área de balance; sin embargo, esto puede subsanarse con el método de recarga potencial, que considera la superficie total del acuífero. Por su parte, el mapa de recarga potencial señala a la región montañosa como zonas de recarga, las cuales pueden definirse como áreas prioritarias de máxima protección en planes y programas orientados al manejo sustentable del acuífero.

Como ventaja frente al balance hídrico del suelo, el método de balance hídrico del acuífero considera la hidrodinámica del acuífero en específico del área de balance definida, así como la evolución del nivel piezométrico. Dicho lo anterior, es importante establecer los parámetros hidrodinámicos lo más precisas posibles, lo cual no ha pasado en este acuífero por lo que deben hacerse nuevas investigaciones orientadas a la obtención de dichos parámetros.

Los valores numéricos pueden coincidir en ambos métodos, pero es importante mencionar que no se puede esperar o buscar que los volúmenes coincidan pues no necesariamente deben ser iguales, porque el principio físico de los métodos es diferente, ya que el balance del acuífero considera el volumen de roca drenada o saturada y el potencial no considera la geología de la zona no saturada y asume que siempre habrá infiltración en el suelo. Finalmente, se considera que se obtuvieron resultados coherentes con lo establecido principalmente por la CONAGUA, sin embargo, se difiere en los volúmenes estimados.

6.2. Recomendaciones

Con base en las características del acuífero Texcoco y los resultados obtenidos en este trabajo se proponen las siguientes recomendaciones orientadas en la mejora o continuidad de futuros estudios de carácter hidrogeológico:

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

- Considerar de manera indispensable la conformación del modelo conceptual del acuífero en cualquier estudio.
- Esclarecer los criterios para la delimitación administrativa de los acuíferos que conforman la Cuenca de México.
- Conformar y desarrollar un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) en los 7 acuíferos de la Cuenca de México, tal como lo establece la Ley de Aguas Nacionales para contribuir a la gestión integrada y sustentable del agua subterránea.
- Realizar y/o actualizar los estudios técnicos relativos a la disponibilidad, calidad y conservación del agua subterránea.
- Actualizar la red de monitoreo piezométrico de la CONAGUA, y así mismo, garantizar el acceso libre a la información de profundidad del nivel estático.
- Realizar una ampliación de la red de monitoreo piezométrico en el área de los límites administrativos del acuífero Texcoco y el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- Actualizar el censo de aprovechamientos subterráneos en el acuífero, ya que el último fue realizado en el año 2006.
- Establecer las características hidrodinámicas del acuífero lo más cercanas a la realidad.
- Aplicar otros métodos de estimación de recarga que consideren a la geología de la zona no saturada, como el método RUDO, que determina la recarga media anual a través de las variables que inciden en la recarga como: precipitación, pendiente del terreno, geología, clases de vegetación y el tipo de suelo, los cuales se clasifican mediante pesos, rangos y puntajes, con base en sus características (Chávez et al., 2007).
- Obtener la precipitación y evapotranspiración de productos que ofrezcan una mejor resolución espacial.
- Considerar a métodos empíricos para obtener el coeficiente de escurrimiento en zonas urbanas.
- Emplear imágenes satelitales recientes en la clasificación de la cobertura de suelo.
- Diseñar e implementar planes de manejo sustentable del agua subterránea a corto, mediano y largo plazo que garanticen la recuperación de los niveles piezométricos y

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

consecutivamente disminuir los efectos derivados de la sobreexplotación a la que se encuentra sometido el acuífero.

- Los trabajos posteriores se recomienda implementar un modelo conceptual del acuífero acoplado bajo escenarios de cambio climático para cuantificar la dinámica espacio-temporal del balance hídrico en el acuífero Texcoco.

Bibliografía

- Ahmed, A., Alrajhi, A., & Alquwaizany, A. (2021). Identification of Groundwater Potential Recharge Zones in Flinders Ranges, South Australia Using Remote Sensing, GIS, and MIF Techniques. *Water*(13). doi:<https://doi.org/10.3390/>
- Alfonso, M. J., Freitas, L., & Chaminé, H. (2019). Groundwater recharge in urban areas (Porto, NW Portugal): the role of GIS hydrogeology mapping. *Sustainable Water Resources Management*(5), 203-216. doi:<https://doi.org/10.1007/s40899-019-00302-9>
- Álvarez, M. (1954). Semblanza de Hermión Larios Torres. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57-60.
- Arce, J., Layer, P., Macías, J., Morales, E., García, A., Jiménez, F., . . . Vásquez, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps, Vol.15, No.2*, 320-332.
- Balek, J. (1988). Groundwater Recharge Concepts. En I. Simmers, *Estimation of Natural Groundwater Recharge* (págs. 3-9).
- Benítez, C., Arias, W., & Quiroz, J. (1980). *Manual de conservación de suelos y agua*. Lima, Perú.
- Carranza, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica*, 93-101.
- Castillo, J. L., Ramos, J. A., Martínez, D. A., Cervantes, A., & Marín, A. E. (2021). Identification of the Dominant Factors in Groundwater Recharge Process, Using Multivariate Statistical Approaches in a Semi-Arid Region. *Sustainability*(13). doi:[10.3390/su132011543](https://doi.org/10.3390/su132011543)
- CGIAR-CSI. (2018). *Base de datos digital de elevación SRTM 90m DEM, versión 4*. Consorcio de Información Espacial (CGIAR-CSI).
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

- CONAGUA. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, Estado de México*. México, D.F.
- CONAGUA. (2005a). *Estudio técnico del impacto por la explotación del agua subterránea de los acuíferos: Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca. Tomo I*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2005b). *Estudio técnico del impacto por la explotación del agua subterránea de los acuíferos: Cuautitlán-Pachuca, Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca. Tomo II*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2005c). *Proyecto Lago de Texcoco. Rescate Hidroecológico*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2006). *Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco - Amecameca*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2007). *Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del acuífero Texcoco (1507)*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2011). *Procesamiento de información de niveles piezométricos de la Cuenca del Valle de México, años 2011*. Subdirección General Técnica, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.
- CONAGUA. (2012). *Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga artificial El Caracol*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2014). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco (1507, Estado de México)*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507) Estado de México*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2020). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Acuíferos por región Hidrológico-administrativa (2020): <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>

- CONAGUA. (15 de 05 de 2021). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Obtenido de <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- CONAGUA-SEMARNAT. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México.
- CONAGUA-UACH. (2009). *Estudio de manejo de la demanda de agua subterránea para el acuífero Texcoco*. Organismo de Cuencas Aguas del Valle de México.
- Custodio, E. (2019). *Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua. Aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España*. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.
- da Costa, M. A., Cardoso da Salis, H. H., Moreira, J. H., & Leal, F. A. (2019). Groundwater Recharge Potential for Sustainable Water Use in Urban Areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. *Sustainability*(11). doi:doi:10.3390/su11102955
- de Vries, J. J., & Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*(10), 5-17. doi:10.1007/s10040-001-0171-7
- Díaz, Z. (1987). *Informe final del proyecto: Control de malezas acuáticas SARH*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica; Secretaría General de Obras; Departamento del Distrito Federal. (1992). *Hidrología subterránea en el valle de México. Ingeniería Hidráulica en México*, 90-98.
- Documentación QGIS. (30 de 04 de 2020). *Una ligera introducción a GIS*. Obtenido de Datos Vectoriales: https://docs.qgis.org/2.8/es/docs/gentle_gis_introduction/vector_data.html
- DOF. (2015). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Ciudad de México.

- DOF. (2019). *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. Ciudad de México.
- Domenico, P. (1972). *Concepts and models in groundwater hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Domenico, P., & Schwartz, F. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: John Wiley y Sons.
- Ducks Unlimited de México, A.C. (DUMAC). (2005). *Programa de conservación y manejo para las aves playeras en el Lago de Texcoco, Estado de México*. Forest Service.
- Eastman, J. (2016). *IDRISI SELVA, Guía para SIG y Procesamiento de imágenes*. Córdoba: Clark Labs.
- Escobar, B. (2010). *Análisis de la sobre-explotación del acuífero de Texcoco*. Texcoco.
- Esri. (30 de 04 de 2020). *ArcGis for Desktop*. Obtenido de ¿Qué son los datos ráster?: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology. 4th ed.* Prentice Hall.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2008). *Base referencia mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional*. Roma, Italia.
- Fries, C. (1960). *Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gaceta del Gobierno. (2015). *Plan municipal de desarrollo urbano de Ecatepec de Morelos Estado de México*. Toluca, Estado de México.
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, Tercera edición*. Ciudad de México: UNAM.

- Gendaszek, A., & Welch, W. (2018). Water Budget of the Upper Chehalis River Basin, Southwestern Washington. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018-5084*, 17.
- Geoevaluaciones y Perforaciones S.A de C.V. (2012). *Estudio de pruebas de recarga continua y su monitoreo, bajo diferentes cargas hidráulicas, en pozos piloto de recarga profunda, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca*. Ciudad de México.
- Guerrero, L., Hernández, M., & Burbey, T. J. (2018). Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(3). doi:<https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.1022>
- Hatch, G. (2018). Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión. En G. Hatch, *Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión* (págs. 151-167). Ciudad de México.
- Healy, R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*. New York: Cambridge.
- Huizar, R., Mendoza, E., & Espinoza, M. (2011). *Proyecto de recarga artificial del acuífero con agua tratada del modulo experimental del tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco*. Ciudad de México: Instituto de Geología, UNAM.
- IFOMEGEM. (2013). *Atlas Geológico Ambiental del Estado de México (Reporte Final)*. Toluca de Lerdo, Estado de México.
- INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología*. México.
- INEGI. (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union)*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2019). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI.
- INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Ciudad de México.

- INIFAP, & CONABIO. (2008). *Edafología, Escala 1:250000*. México: Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Kampf, S. K., Burges, S. J., Hammond, J. C., Bhaskar, A., Covino, T. P., Eurich, A., . . . Willi, K. (2020). The Case for an Open Water Balance: Re-envisioning Network Design and Data Analysis for a Complex, Uncertain World. *Water Resources Research*, 56, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1029/2019WR026699>
- Kebede, S. (2013). Groundwater Potential, Recharge, Water Balance: Vital Numbers. *Springer Hydrogeology*, 221-236. doi:10.1007/978-3-642-30391-3_7
- Khan, R., Karan, R., & Islam, S. (2016). Methods of Estimating Groundwater Recharge. *International Journal of Engineering Associates*, 5-9.
- Lerner, D. (1990). *Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge*. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH.
- Lerner, D. N. (1990). Groundwater Recharge In Urban Areas. *Atmospheric Environment*, 24B(1), 29-33. doi:10.1016/0957-1272(90)90006-G
- Lerner, D., Issar, A., & Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge a guide to understanding and estimating natural recharge*. Hannover: Heise.
- Lesser, J. (2005). El agua subterránea de la Ciudad de México. *V Congreso de Aguas Subterráneas* (págs. 1-8). Hermosillo, Sonora: Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Lojero, V. (2014). *Evaluación de los asentamientos por consolidación de los suelos lacustres en la zona del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el antiguo Lago de Texcoco (Tesis de Maestría)*. Universidad Complutense de Madrid.
- Lugo, H., & Salinas, A. (1996). Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (Al norte de la Ciudad de México) y su relación con los peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 240-251.

- Mendoza, E. (2012). *Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mengistu, T. D., Chung, I.-M., Chang, S. W., Yifru, B. A., Kim, M. G., Jeongwoo, L., . . . Kim, I. H. (2021). Challenges and Prospects of Advancing Groundwater Research in Ethiopian Aquifers: A Review. *Sustainability*(13). doi:10.3390/su132011500
- Microsoft. (26 de 08 de 2020). *Soporte técnico de Microsoft Office*. Obtenido de Elegir la mejor línea de tendencia para los datos: <https://support.microsoft.com/es-es/office/elegir-la-mejor-1%C3%ADnea-de-tendencia-para-los-datos-1bb3c9e7-0280-45b5-9ab0-d0c93161daa8>
- Mooser, F. (1961). *Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México y zonas colindantes (No.557.25 C6)*. Ciudad de México: Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.
- Oak Ridge National Laboratory DAAC. (10 de 02 de 2021). *Daily surface weather and climatological summaries* . Obtenido de <https://daymet.ornl.gov/>
- Rendón, M., & Cisneros, J. (2002). Calidad físicoquímica y microbiológica en efluentes secundarios por el lago artificial "Nabor Carrillo", México. *XIII Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales* (págs. 1-11). Guanajuato, México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Rudolph, D., Cherry, J., & Farvolden, R. (1991). Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City. *Water Resources Research*, 2187-2201.
- Rushton, K. (1988). Numerical and Conceptual Models for Recharge Estimation in Arid and Semi-Arid Zones. En I. Simmers, *Estimation of Natural Groundwater Recharge* (págs. 223-238). NATO ASI Series book series (ASIC, volume 222).
- Sánchez, F. J. (2017). Acuíferos semiconfinados. En F. J. Sánchez, *Hidrología superficial y subterránea* (págs. 256-276).
- Sanford, W. (2002). Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology Journal*(10), 110-120. doi: 10.1007/s10040-001-0173-5

- Savoca, M., Senay, G. B., Maupin, M. A., Kenny, J. F., & Perry, C. A. (2013). Actual Evapotranspiration Modeling Using the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Approach. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5126*, 16 p.
- Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*(20), 3335-3370. doi:10.1002/hyp.6335
- Scanlon, B., Healy, P., & Cook, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, No. 10, 18-39.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (1969). *Proyecto Texcoco, memoria de los trabajos realizados y conclusiones* . Ciudad de México: Fiduciaria Nacional Financiera S.A.
- Shulz, J., & García, F. (2015). *Balance hídrico y recarga de acuíferos*. Chile: Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Suárez, P. (2019). *Modelo matemático de flujo del acuífero de Texcoco, como una herramienta de gestión y planificación hídrica para el desarrollo sustentable de la región (Tesis)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tleane, J., & Ndambuki, J. (2020). Estimation of Groundwater Recharge Using GIS Method: A Case Study of Makotopong Village-Polokwane, South Africa. *Journal of Water Resource and Protection*(12), 985-1000. doi: 10.4236 / jwarp.2020.1211059
- UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*. París, Francia.
- UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021*.
- UNESCO, & IWSSM. (2021). *The Role of sound groundwater resources management and governance to achieve water security*. Pieona Books.

- Vazquez, E., & Jaimes, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 133-190.
- Vélez, M., García, S., Ruiz, V., & Sánchez, Á. (2020). Towards a Sustainable and Adaptive Groundwater Management: Lessons from the Benalup Aquifer (Southern Spain). *Sustainability*(12). doi:10.3390/su12125215
- Wang, G., Shi, H., Li, X., Yan, J., Miao, Q., Li, Z., & Akae, T. (2020). A Study on Water and Salt Transport, and Balance Analysis in Sand Dune-Wasteland-Lake Systems of Hetao Oases, Upper Reaches of the Yellow River Basin. *Water*(12). doi:doi:10.3390/w12123454