



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**MODELO HIDROLÓGICO DEL SUELO DE CONSERVACIÓN DE  
LA CIUDAD DE MÉXICO**

**TESIS**

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**(AGUAS SUBTERRÁNEAS)**

**PRESENTA:**  
**JUAN CAMILO MONTAÑO CARO**

Tutor Principal:  
**DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES**  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Comité Tutor:  
**DRA. BLANCA PRADO PANO**  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**DR. ERIC MORALES CASIQUE**  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., enero de 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**La realización de esta tesis, se deriva del proyecto denominado “Caracterización de los sistemas de flujo de agua subterránea para apoyar la sostenibilidad de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” con clave PAPIIT–IN106718. Bajo la coordinación técnica del Dr. Oscar Escolero Fuentes, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.**

## Contenido

Lista de figuras .....	6
Lista de tablas .....	8
Resumen .....	12
1. Introducción.....	14
2. Antecedentes.....	16
3. Justificación .....	17
4. Preguntas de investigación .....	18
5. Hipótesis .....	18
6. Objetivo General.....	18
6.1. Objetivos particulares .....	18
7. Marco teórico.....	19
7.1. Suelo de conservación.....	19
7.2. Servicios ecosistémicos .....	19
7.2.1. Clasificación de los servicios ecosistémicos .....	20
7.3. Ciclo hidrológico .....	23
7.3.1. Cambio de uso del suelo y su repercusión en la recarga .....	26
7.4. Influencia de las fallas en los sistemas de flujo .....	27
7.5. Modelos hidrológicos.....	29
7.5.1. Modelación Lluvia-Escorrentía .....	30
8. Área de estudio .....	34
8.1. Suelo de Conservación de la Ciudad de México .....	34
8.2. Servicios ecosistémicos .....	36
8.3. Clima.....	36
8.4. Geología.....	37

8.5.	Edafología.....	40
9.	Metodología.....	40
9.1.	Fase 1. Recopilación y monitoreo.....	42
9.1.1.	Recopilación de información.....	42
9.1.2.	Monitoreo en campo.....	42
9.2.	Fase 2. Generación de información faltante y procesamiento.....	45
9.2.1.	Generación información climática (R).....	45
9.2.2.	Generación información edafológica (Machine Learning, Soil wáter Characteristics).....	47
9.2.3.	Procesamiento de la información recopilada.....	51
9.3.	Fase 3. Modelación.....	53
9.3.1.	Modelo Conceptual hidrológico.....	54
9.3.2.	Modelo hidrológico (SWAT).....	54
9.3.3.	Calibración.....	54
9.3.4.	Escenario hipotético.....	55
10.	Resultados.....	56
10.1.	Resultados Fase 1.....	56
10.1.1.	Monitoreo en campo.....	56
10.1.2.	Caudal aportado por manantiales.....	61
10.2.	Resultados fase 2.....	64
10.2.1.	Topografía.....	64
10.2.2.	Uso del Suelo.....	66
10.2.3.	Edafología.....	68
10.2.4.	Subcuencas.....	70
10.3.	Resultados Fase 3.....	72

10.3.1.	Modelo Hidrológico Conceptual.....	72
10.3.2.	Modelo .....	75
10.3.3.	Calibración.....	76
10.3.1.	Escenario hipotético.....	84
11.	Discusión de resultados .....	91
11.1.	Modelo hidrológico conceptual.....	91
11.2.	Modelo .....	95
11.3.	Sensibilidad .....	96
11.4.	Percolación y recarga .....	96
11.5.	Escenario hipotético .....	99
12.	Conclusiones.....	101
13.	Referencias .....	102

## Lista de figuras

Figura 7-1 Esquema de clasificación de servicios ecosistémicos(Turner et al., 2008) .....	23
Figura 8-1. Suelo de Conservación de la Ciudad de México (GDF, 2012).....	35
Figura 8-2 Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Modificado de (INEGI, 2019c).....	36
Figura 8-3 Sierra de las Cruces. Tomado de (García-Palomo et al., 2008).....	38
Figura 9-1 Metodología aplicada.....	41
Figura 9-2 Manantiales y Ríos monitoreados. Modificado de (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c) .....	43
Figura 9-3 Agrupamiento de manantiales (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c).....	44
Figura 9-4 Estaciones Climáticas (CONAGUA, 2020).....	45
Figura 9-5 Tipo de Suelo Modificado de (INEGI, 2019a) .....	47
Figura 9-6 Programa Harmonized World Soil Data base (FAO y ISRIC, 2012).....	48
Figura 9-7 Base de datos armonizada de Los Suelos del Mundo (FAO y ISRIC, 2012) ....	48
Figura 9-8 Localización perfiles de suelo (INEGI, 2019c; Peña Ramirez, 2013).....	49
Figura 9-9 Programa Soil Water Characteristics (Saxton y Rawls, 2009) .....	50
Figura 9-10 Geología Suelos de Conservación de la Ciudad de México (INEGI, 2019c, 2019b).....	51
Figura 10-1 Distribución de Manantiales (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c).....	56
Figura 10-2 Caudales monitoreados sector Magdalena.....	57
Figura 10-3. Variación de la precipitación Suelo de Conservación .....	58
Figura 10-4 Caudales manantiales sector Ajusco-San Nicolás .....	59
Figura 10-5. Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Eslava.....	60
Figura 10-6 Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Viborillas .....	61
Figura 10-7 Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Eslava.....	61
Figura 10-8 Agrupación de manantiales (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c).....	62
Figura 10-9 Estimación de caudal para de manantiales para las Subcuencas 19 y 15 .....	63
Figura 10-10 Modelo de Elevación Digital (INEGI, 2019c).....	64

Figura 10-11 Pendiente en el Suelo de Conservación (INEGI, 2019c).....	65
Figura 10-12 Uso de Suelo. Modificado de (CONABIO, 2017).....	67
Figura 10-13 Predicción profundidad de suelo (INEGI, 2019c) .....	68
Figura 10-14 Tipo de suelo final (INEGI, 2019c, 2019a) .....	69
Figura 10-15 Subcuencas (INEGI, 2019c) .....	71
Figura 10-16 Geología reclasificada ( Arce et al., 2019; INEGI, 2019c).....	73
Figura 10-17 Manantiales, zona de fallas ( Arce et al., 2019; García-Palomo et al., 2008; GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c) .....	74
Figura 10-18 Ajuste Subcuenca 18.....	77
Figura 10-19Ajuste Subcuenca 19.....	77
Figura 10-20 Ajuste Subcuenca 14.....	78
Figura 10-21 Sensibilidad de los caudales a la Conductividad hidráulica .....	78
Figura 10-22 Sensibilidad de los caudales al tiempo de retraso de recarga .....	79
Figura 10-23 Sensibilidad de los caudales al retardo flujo lateral.....	80
Figura 10-24 Precipitación y almacenamiento de agua en el Suelo de Conservación .....	81
Figura 10-25 Tasa de percolación y recarga en el Suelo de Conservación. ....	83
Figura 10-26 Cambio de uso de Suelo Escenario hipotético (Elaboración propia).....	88
Figura 10-27 Comparación cambio de uso del Suelo Escenario1 .....	89
Figura 11-1 Inversión de los gradientes por la extracción de pozos. Tomado de Flórez (2019).....	93

## Lista de tablas

Tabla 7-1 Clasificación de los servicios ecosistémicos (MEA, 2005) .....	21
Tabla 7-2 Clasificación de los servicios ecosistémicos y sus conexiones con valores humanos y procesos del ecosistema (Wallace, 2007).....	22
Tabla 9-1. Estaciones Climáticas (CONAGUA, 2020).....	46
Tabla 9-2. Clasificación de Coberturas.(CONABIO, 2017) .....	53
Tabla 10-1 Caudales manantiales sector Magdalena.....	57
Tabla 10-2. Caudales de manantiales sector Ajusco-San Nicolás.....	58
Tabla 10-3. Caudales de ríos monitoreados con el sensor.....	60
Tabla 10-4. Estimación de aporte de los manantiales a las subcuencas .....	63
Tabla 10-5. Distribución de alturas Suelo de Conservación. ....	64
Tabla 10-6. Distribución de pendiente .....	65
Tabla 10-7. Porcentaje Uso del Suelo en el área de estudio.....	67
Tabla 10-8. Distribución porcentual de tipo de suelo.....	70
Tabla 10-9 Claves de tipo de suelo y profundidad .....	70
Tabla 10-10.Distribución de Subcuencas en el Suelo de Conservación.....	72
Tabla 10-11. Distribución uso y cobertura en las HRU .....	75
Tabla 10-12. Distribución de los tipos de suelo en las HRU.....	76
Tabla 10-13. Percolación y recarga estimada en el tiempo de monitoreo en el Complejo Volcánico de Chichinautzin.....	82
Tabla 10-14 Percolación y recarga estimada en el tiempo de monitoreo en Sierra de las Cruces .....	83
Tabla 10-15 Precipitación anual Suelo de Conservación .....	83
Tabla 10-16 Estimación de aporte agua subterránea para el Río Magdalena.....	84
Tabla 10-17 Percolación que ocurre en uso y cobertura del Complejo Volcánico de Chihinautzin.....	85
Tabla 10-18 Recarga que ocurre en uso y cobertura Complejo Volcánico del Chihinautzin .....	86
Tabla 10-19 Percolación según uso y cobertura Sierra de las Cruces .....	86
Tabla 10-20 Recarga según uso y cobertura Sierra de las Cruces .....	87
Tabla 10-21 Cambios de área de escenario real a escenario hipotético .....	88

Tabla 10-22. Respuesta al escenario hipotético en el Complejo Volcánico de Chichinautzin .....	90
Tabla 10-23 Respuesta al escenario hipotético en la Sierra de las Cruces. ....	91

## ***Agradecimientos Académicos***

*Agradezco:*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México*

*Al Posgrado en Ciencias de la Tierra*

*Al Instituto de Geología*

*Al CONACyT por la beca para realización de mis estudios de maestría.*

*Al Proyecto 290832 FONCICYT, ANR-CONACYT “TRAJECTORIES OF SOCIAL-ECOLOGICAL SYSTEMS IN LATIN AMERICAN WATERSHEDS: FACING COMPLEXITY AND VULNERABILITY IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE (TRASSE)” y al proyecto 5526 de Problemas Nacionales, CONACYT “Observatorio Nacional para la Sustentabilidad Socio-ecológica (ONSSES)”;* por el apoyo proporcionado para salidas de campo, equipamiento y material.

*A mi tutor principal, el **Dr. Oscar Escolero**, quien me oriento no solo en el aspecto académico, también me encamino a ser una persona más integra y cultivo en mí el propósito de aportar a la sociedad por medio de la educación.*

*A la **Dra. María Perevochtchikova**, por su acompañamiento y coordinación en la logística en campo. Además, por su incondicional apoyo en los diversos inconvenientes que se presentaron.*

*A la **Dra. Blanca Prado** y al **Dr. Erick Cacique** por ser parte del comité tutorial y por sus recomendaciones que permitieron el cumplimiento de los objetivos propuestos.*

*A los integrantes de mi examen de grado **Dra. Lucy Mora, Dr. Lorenzo Vásquez, Dr. Tomas Gonzales, Dra. María Perevochtchikova y Dr. Oscar Escolero**. Muchas gracias por sus observaciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo y formación como maestro.*

*A **Priscila Medina** y **Raúl Silva** por su constante apoyo, resolución de dudas y palabras de aliento en los momentos más complejos. A **Sandra Blanco** por su excelente trabajo en equipo y a **Jose Florez, Selene Olea** por sus aportes que mejoraron mi entendimiento.*

*A las comunidades del Ajusco, Magdalena y San Nicolás por su amabilidad y disposición de colaborar en todo momento.*

### ***Agradecimientos personales***

*A María Yolanda Caro Aguirre, mi madre, por ser guía y ejemplo. Por enseñarme a soñar alto y sin miedo a caer. Por ser mi amiga, mi consejera y mi sostén en momentos “difíciles”.*

*A Edilfonso Montaña Castro, mi padre, que sin importar mi edad siempre está dispuesto ayudarme y nunca duda en manifestar su amor. Quien me enseñó que, si miras con detenimiento, todas las cosas en el mundo tienen algo bello y maravilloso.*

*A Yuccelli Carbone, mi copiloto, por acompañarme en esta aventura sin titubeos. Enseñarme el significado de pareja, y por permitirme crecer como persona y esposo a su lado.*

*A José Florez por abrir el camino incierto y mostrarme que era posible.*

*A mis amigos y familiares cercanos que me apoyaron en los momentos tristes y de flaqueza a continuar por el camino escogido.*

## **Resumen**

El Suelo de Conservación de la Ciudad de México se localiza en la parte sur de la ciudad y es de gran importancia por los servicios ambientales que brinda, como lo son la preservación de la biodiversidad, el mantenimiento del ciclo hidrológico, la captura de carbono y otros servicios que mejoran la calidad de vida de los habitantes.

El Suelo de Conservación es ampliamente conocido como una zona de recarga de agua subterránea para el sistema de flujo de la Ciudad de México. Investigadores como Peñuela (2007), Durazo y Farvolden (1989), Birkle et al.(1998) y Escolero Fuentes (2018), entre otros; han identificado condiciones favorables que presentan la zona para el proceso de infiltración. Servicios ecosistémicos hídricos en el Suelo de Conservación han sido ampliamente estudiados por Perevochtchikova y Beltrán (2010), Almeida-Leñero et al (Almeida-Leñero et al., 2007) y otros autores. Sin embargo, las investigaciones previas no se han enfocado en describir el funcionamiento del proceso de recarga en el Suelo de Conservación.

En este estudio se caracterizó el proceso de recarga de agua subterránea en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México iniciando con la recopilación de información, tanto en campo como en gabinete. Se utilizaron nuevas metodologías como aprendizaje automático para predecir la profundidad del suelo (Pedregosa et al., 2011), el software libre R (R Core Team, 2013) para rellenar los datos climáticos faltantes generar y así suplir los vacíos de información a partir de información secundaria. Se creó un modelo hidrológico conceptual con el objetivo de identificar las diferencias geológicas, estructurales, topográficas y edafológicas entre la Sierra de Las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin que permitan entender el funcionamiento del Suelo de Conservación de la Ciudad de México como zona de recarga. Del mismo modo, se generó un modelo hidrológico con el programa SWAT con el cual se cuantificaron los valores de percolación y recarga, y se analizó la respuesta en la recarga ante cambio de uso de suelo.

Los resultados sugieren que, si bien las condiciones edafológicas y topográficas favorecen el proceso de recarga de agua subterránea a pesar de algunos usos de suelo que perjudican el proceso de infiltración como la agricultura y el uso urbano, el proceso de recarga de agua subterránea en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México funciona de manera

diferenciada entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin debido a las características geológicas y estructurales que generan diferentes procesos hídricos en superficie.

El agua que se infiltra en la Sierra de las Cruces se descarga en los manantiales y caudales base de los ríos perennes presentes en las partes altas por lo que el aporte al sistema de flujo principal de la Ciudad de México es bajo. Por otra parte, las condiciones geológicas, hidrológicas y estructurales del Complejo Volcánico de Chichinautzin lo posicionan como la zona de recarga principal de agua subterránea.

El resultado del ajuste en el proceso de calibración sugiere que la utilización de nuevas metodologías para suplir los vacíos de información son una alternativa eficiente y a bajo costo

El estudio contribuyo al entendimiento del proceso de recarga en el Suelo de Conservación y servirá como herramienta, sumado a otras investigaciones, para la toma de decisiones sobre la gestión del agua.

## **1. Introducción**

A través de la historia, las ciudades han concentrado gran número de personas por ser centros de intercambios económicos, y concentrar bienes y servicios que mejoran la calidad de vida de la población (Echenique, 2006). Sin embargo, el creciente aumento de la población y la industria en las ciudades ha generado el aumento en la demanda de recursos, agua y suelo entre otros, para suplir las necesidades básicas como son vivienda y alimentación (Montico et al., 2019).

La satisfacción de necesidades en las ciudades ha originado la expansión de estas y a su vez, la alteración y modificación de las zonas naturales en su periferia (Montico et al., 2019). Las zonas naturales brindan Servicios Ecosistémicos (SE), que son todos aquellos beneficios que obtienen las personas provenientes de los ecosistemas (MEA, 2005). Los Servicios Ecosistémicos se clasifican en servicios de provisión, regulación, soporte y culturales. Los servicios de provisión son aquellos que se puede consumir directamente de los recursos naturales sin ninguna manipulación. Los servicios de regulación regulan las condiciones del habitat, como el ciclo hídrico, y minimizan el impacto por eventos extremos como inundaciones y cambios de temperatura. Los servicios de soporte permiten la generación de los otros SE, ya que sustenta los procesos primarios para su producción. Finalmente, los servicios culturales brindan experiencias placenteras o benéficas, permitiendo actividades recreativas, estéticas, entre otras (MEA, 2005).

Los servicios ecosistémicos relacionados con el agua se les conoce como servicios ecosistémicos hídricos (SEH). Son de gran importancia debido a la necesidad del recurso hídrico para la vida. Regulación de caudales, mitigación de inundaciones, recarga de acuíferos, purificación, control de erosión y conservación de manantiales son algunos de los SEH (Perevochtchikova y Torruco, 2014).

Con el propósito de proteger los SEH, se han creado zonas naturales protegidas. El suelo de conservación es un ejemplo de estas zonas y hace referencia a una zona claramente delimitada que posee ciertas características ecológicas, las cuales son de gran interés e importancia para la sociedad debido a los servicios ambientales o ecosistémicos que suministra y que permiten una mejor calidad de vida a la comunidad aledaña (Nathan y Scobell, 2012).

En la Ciudad de México, el Suelo de Conservación se localiza en la parte sur y se considera la zona de recarga de agua subterránea del sistema de flujo de la Cuenca de México (Escolero et al., 2009; Perevochtchikova y Vázquez, 2010). Sin embargo, las zonas de recarga efectiva deben cumplir algunas condiciones que favorezcan la infiltración y el posterior aporte a el agua subterránea. Entre esas condiciones se encuentran la cantidad de precipitación, las propiedades hídricas del suelo y la configuración geológica (Freeze y Cherry, 1979).

Si la configuración es homogénea en todo el suelo de conservación, la interacción de agua superficial y subterránea será la misma. No obstante, los procesos hídricos que ocurren son diferentes en la Sierra de las Cruces (SC) y el Complejo Volcánico de Chichinautzin (CVC), las cuales son las zonas que conforman el Suelo de Conservación. La diferencia en los procesos sugiere características geológicas y edafológicas diferentes en cada zona que hacen que el proceso de recarga ocurra de manera diferenciada en el Suelo de conservación de la Ciudad de México.

## **2. Antecedentes**

En el Suelo de Conservación se han desarrollado algunas investigaciones que presentan cierta relación con el proceso de recarga, ya sea por la descripción del proceso o por la identificación de SEH que permiten que ocurra. Almeida-Leñero et al. (2007) identificaron y evaluaron los servicios ecosistémicos en la Cuenca del Río Magdalena, la cual representa el 4% del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. San Miguel Villegas (2010) estudio la expansión urbana ocurrida en el Suelo de Conservación, específicamente en la Delegación de Tláhuac. San Miguel concluyo que ha ocurrido un cambio del uso del suelo, de agrícola a urbano, aunque se encuentre prohibido debido a la ambigüedad en las leyes y la permisividad en los asentamientos irregulares. Cram et al. (2008) identificaron la acelerada impermeabilización del suelo por generación de vías y viviendas que ocurre en zonas de recarga de agua subterránea entre ellas la Delegación Magdalena Contreras. Generando mayor erosión hídrica y disminución de la recarga. María y Adrián (2010) analizaron los pagos por servicios ambientales hidrológicos en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México y concluyeron que no han logrado disminuir la tala clandestina, afectando las zonas de recarga potencial del sistema de flujo local. Perevochtchikova y Torruco (2014) analizaron los programas de pagos por servicios ambientales, tanto el federal como el local, y concluyeron que, si bien existe una nueva motivación de conservar el suelo por los incentivos económicos, existen otras actividades que promueven los programas que van en contrasentido a la conservación natural. Con respecto al entendimiento del proceso de recarga, Birkle et al. (1998) identificaron las principales áreas de recarga de la Cuenca de México y las clasificaron por su orden de importancia, siendo la Sierra de las Cruces la más importante, seguida por la Sierra Nevada y Sierra Chichinautzin. Peñuela (2007) identificó la sierra de las cruces y la sierra nevada como zonas de recarga de agua subterránea de flujos locales e intermedios a partir de hidrogeoquímica e isotopos.

### **3. Justificación**

El Suelo de Conservación de la Ciudad de México brinda Servicios ecosistémicos como son Captura de carbono, biodiversidad y paisaje, y Servicio ambientales (Perevochtchikova y Vázquez, 2010). Sin embargo, el continuo crecimiento de la mancha urbana, evidenciada en Perevochtchikova y Vázquez (2010), ha generado deterioro de las zonas naturales y pérdida de la cobertura vegetal. En el caso de los SEH, las modificaciones en las zonas naturales pueden repercutir en la disminución de la calidad del agua y/o afectar los volúmenes de recarga para agua subterránea (Libreros-Muñoz, 2004) .

Al ser la Ciudad de México una megalópolis la cual va aumentando su población constantemente a través de los años, se hace indispensable la gestión del agua de tal manera que se garantice este recurso vital (Escolero et al., 2009) . Siguiendo este objetivo, se requiere el entendimiento del ciclo hidrológico y la interacción con el medio con el fin de facilitar y mejorar la toma de decisiones.

En este trabajo se realizó un modelo hidrológico del Suelo de Conservación de la Ciudad de México con el fin de identificar las diferencias geológicas, hidrológicas y edafológicas entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin que puedan influir en el proceso de recarga de agua subterránea. Para los insumos faltantes se implementó nuevas metodologías que permiten la generación de datos a partir de información secundaria.

Definir el proceso de recarga generará un mejor entendimiento del ciclo hidrológico y servirá de herramienta para la gestión del recurso hídrico ya que se evidenciará que el Suelo de Conservación se comporta de manera diferenciada en el proceso de recarga de agua subterránea. Además, el uso de nuevas tecnologías para la adquisición de datos de entrada para los modelos a partir de información secundaria se presenta como una nueva alternativa para llenar la ausencia de insumos.

#### **4. Preguntas de investigación**

1. ¿El proceso de recarga de agua subterránea de la Ciudad de México presenta las mismas características en todo el Suelo de Conservación?
2. ¿Cómo afecta el cambio de uso del suelo el proceso de recarga en el Suelo de Conservación?

#### **5. Hipótesis**

El Suelo de Conservación de la Ciudad México funciona de manera diferenciada como zona de recarga de agua subterránea para la Cuenca de México debido a las diferencias geológicas y estructurales que presentan La Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin. La presencia de manantiales en la parte alta de la Sierra de las Cruces, la vegetación boscosa, así como su litología más antigua y los sistemas de fallas presentes en la zona, indican que el agua que se infiltra de la precipitación se descarga en los manantiales y niveles base de los ríos perennes. Por otra parte, la ausencia de tributarios, el alto grado de infiltración, su composición litológica, entre otras características, identifica al Complejo Volcánico de Chichinautzín como la zona principal de recarga para el sistema de flujo de la Cuenca de México.

#### **6. Objetivo General**

Describir el proceso de recarga en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

##### **6.1. Objetivos particulares**

- Utilizar nuevas metodologías, como machine learning y R estadistic, para la generación de datos de entrada necesarios para el modelo a partir de información secundaria.
- Crear un modelo Hidrológico del Suelo de Conservación relacionándolo con información geológica.
- Conocer la respuesta en la recarga por el cambio de uso del suelo.

## 7. Marco teórico

### 7.1. Suelo de conservación

El suelo de conservación hace referencia a una zona claramente delimitada, que posee ciertas características ecológicas, las cuales son de gran interés e importancia para la sociedad debido a los **servicios ambientales o ecosistémicos** que suministra y que permiten una mejor calidad de vida a la comunidad aledaña (Nathan y Scobell, 2012). Con el fin de salvaguardar los servicios ambientales, se estipulan normas y leyes sobre las actividades y procesos permitidos en dicha zona.

### 7.2. Servicios ecosistémicos

El desarrollo de la industrialización y el modelo económico consumista se basa en el aumento continuo de la demanda. Al aumentar la demanda, la producción para satisfacer estas nuevas “necesidades” también aumenta. Por esta razón, se ha venido presentando la intervención y modificación de áreas naturales para el desarrollo de actividades económicas (Camacho, 2016). Sin embargo, en el modelo económico actual no se tiene en cuenta los productos y servicios que suministra los ecosistemas. El enfoque de servicios ecosistémicos nace de la necesidad de cuantificar y asignar un valor económico a los servicios y productos que la naturaleza le brinda al hombre con el fin de facilitar la gestión y la toma de decisiones incorporando el Capital Natural, al Capital económico y Capital humano como medida de riqueza de un país (Camacho, 2016; MEA, 2003).

Aunque este enfoque se viene desarrollando desde la década de 1960, en la actualidad no hay una única definición de que son los servicios ecosistémicos:

- Para Westman (1977) los servicios ecosistémicos son los servicios de la naturaleza.
- Son las condiciones y procesos que sustentan y satisfacen la vida humana y que provienen de los ecosistemas naturales y especies allí presentes (Daily, 1997)
- Bienes y servicios que representan beneficios para la población humana suministrados directa o indirectamente por los ecosistemas (Costanza, 2008).
- Capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas (De Groot et al., 2002).
- Los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas (MEA, 2003).

- Aspectos utilizados activa o pasivamente para producir bienestar humano que proviene de los ecosistemas (Fisher et al., 2009).

Si bien no se tiene una única definición, se logra observar que existen muchas coincidencias y que a nivel general los servicios ecosistémicos hacen referencia a los productos y servicios que benefician al hombre directa e indirectamente manteniendo o mejorando su calidad de vida y que provienen de los ecosistemas y las especies que allí habitan.

### 7.2.1. Clasificación de los servicios ecosistémicos

El objetivo de la clasificación y jerarquización de los servicios ecosistémicos es la identificación clara y sin ambigüedades que permita la asignación de un valor económico a cada servicio. Así como no existe una única definición de servicios ecosistémicos, de igual manera no existe una sola clasificación de estos servicios (Camacho, 2016).

La clasificación más utilizada y difundida es la propuesta por la Evaluación de los ecosistemas del Milenio (MEA, 2003) y que define los servicios ecosistémicos como “Los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas”.

Clasifica a los servicios en 4 clases de acuerdo con el funcionamiento:

- Servicios de provisión: Productos obtenidos directamente de los ecosistemas.
- Servicios de regulación: Beneficios obtenidos de la regulación de procesos de los ecosistemas.
- Servicios culturales: Beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas.
- Servicios de soporte: Servicios necesario para la producción de otros servicios de los ecosistemas:

Servicios de provisión	Servicios culturales
Alimentos	Espiritual y religioso
Agua dulce	Recreativo y turístico
Leña	Estético
Fibras	Inspirativo
Bioquímicos	Educativo

Recursos genéticos	Identidad del sitio Herencia cultural
<b>Servicios de regulación</b>	<b>Servicio de soporte</b>
Regulación de clima Regulación de enfermedades Regulación y saneamiento del agua Polinización	Formación de suelos Reciclaje de Nutrientes Producción primaria

Tabla 7-1 Clasificación de los servicios ecosistémicos (MEA, 2005)

Sin embargo, esta clasificación, aunque sencilla y accesible, no necesariamente es útil a la hora de estimaciones económicas o valoraciones ambientales puesto que se podría pecar en doble estimación o valoración por la relación que presenta los servicios de soporte con los demás (Fisher et al., 2009).

Por lo anterior, surgen 2 nuevas propuestas de clasificación que buscan jerarquizar y clasificar de una manera óptima los servicios:

Wallace (2007) presentó un nuevo sistema de clasificación el cual permite evaluar las consecuencias de manipular los ecosistemas para el bienestar humano, con el propósito de facilitar la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales promoviendo la conservación y el sustento. En el modelo definió categorías de valor para el hombre, los relacionó con los servicios que recibe, los procesos y los bienes que deben ser gestionados para la generación de dichos servicios (Wallace, 2007).

<b>Categoría de valor humano</b>	<b>Servicios ecosistémicos experimentados a un nivel humano (individual)</b>	<b>Ejemplo de los procesos y bienes que requieren ser manejados para derivar en servicios ecosistémicos</b>
Recursos suficientes de Protección de depredadores /enfermedades/parásitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimento</li> <li>• Oxígeno</li> <li>• Agua(potable)</li> <li>• Energía</li> <li>• Dispersión de enfermedades</li> </ul>	<p><b>Procesos del ecosistema</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulación biológica</li> <li>• Regulación del clima</li> <li>• Regulación del gas</li> <li>• Manejo de tierra para recreación</li> <li>• Regulación de nutrientes</li> <li>• Polinización</li> </ul>

Condiciones ambientales propicias (físicas y químicas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección de depredadores</li> <li>• Protección de enfermedades y parásitos</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Humedad</li> <li>• Luz</li> <li>• Química</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación y retención de suelos</li> </ul>
Cumplimiento sociocultural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Satisfacción espiritual y filosófica</li> <li>• Recreacional</li> <li>• Estético</li> <li>• Valores de oportunidad, capacidad para evolución biológica y cultural</li> </ul>	<p><b>Elementos bióticos y abióticos</b></p> <p>Los procesos son manejados para proporcionar una composición y estructura particular de los elementos del ecosistema. Los elementos pueden ser descritos como bienes de los recursos naturales como, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodiversidad</li> <li>• Tierra</li> <li>• Agua</li> <li>• Aire</li> <li>• Energía</li> </ul>

**Tabla 7-2 Clasificación de los servicios ecosistémicos y sus conexiones con valores humanos y procesos del ecosistema (Wallace, 2007).**

Por último, Turner et al. (2008) propusieron un sistema de clasificación que diferencie servicios intermedios y finales de acuerdo con la relación que tengan los servicios con el bienestar humano.

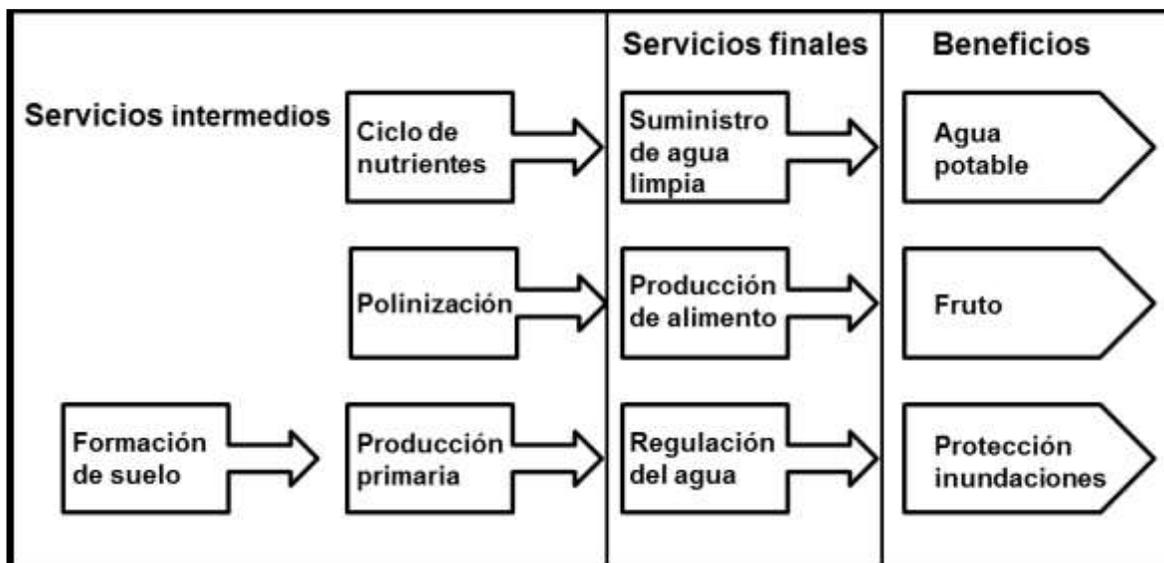


Figura 7-1 Esquema de clasificación de servicios ecosistémicos (Turner et al., 2008)

Aunque existen numerosos autores que han estudiado sobre los SE y SEH, el alcance de este estudio se centra en la descripción del proceso de recarga de agua subterránea en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Por lo tanto, la descripción de los SE y SEH se realiza de una manera general con el propósito de contextualizar al lector y utilizarlo como puente entre el Suelo de Conservación y el ciclo hidrológico, específicamente la recarga.

### 7.3. Ciclo hidrológico

El escurrimiento y la recarga de agua subterránea en los ecosistemas están supeditados a características externas como la precipitación y temperatura; y a características internas como son la geología, el suelo (su capacidad de infiltración) y la morfología (K. P. Seiler y Gat, 2007).

La **precipitación** ocurre cuando las masas de aire cálido se enfrían, condensándose y generando el descenso en forma líquida del agua. Se puede presentar por presencia de orogénias de gran altitud (precipitación orográfica) o por interacción con masas de aire frío (precipitación frontal o convectiva) (K. P. Seiler y Gat, 2007).

Durante la precipitación y por efecto de la **temperatura**, la totalidad de la precipitación o una parte puede evaporarse impidiendo su arribo a la superficie. Otra parte de la lluvia es interceptada por la vegetación o infraestructura presente (Campos, 1998).

Cuando la lluvia se deposita en superficie ésta se distribuirá en **flujo superficial** e **infiltración**. Existe una relación directa entre la capacidad de infiltración del suelo y la generación de esorrentía superficial. El flujo superficial ocurre cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo; saturándolo y favoreciendo el flujo horizontal sobre el vertical (K. P. Seiler y Gat, 2007). Por esta razón, la intensidad de precipitación, así como la cantidad de agua existente en el suelo antes de la lluvia influyen de manera directa en la generación de flujo superficial. De igual manera, la **topografía** favorecerá la generación de flujo superficial cuando se trate de morfologías de grandes pendientes, debido a que el agua será más susceptible a moverse sobre la superficie por fuerzas gravitatorias (Campos, 1998; K. P. Seiler y Gat, 2007).

Como se mencionó anteriormente, el flujo superficial depende de la capacidad de infiltración del suelo. La **infiltración** es el proceso en el cual el agua que se encuentra en la superficie del suelo pasa hacia su interior (Campos, 1998). Según el manejo del suelo la infiltración puede variar ya que esta propiedad es muy sensible a cambios en la compactación (Davidoff y Selim, 1986).

De acuerdo a Rodríguez-Vásquez et al. (2008), El contenido de arcilla, limo y arena influyen directamente en la capacidad de infiltración del suelo. Se observa que la infiltración está relacionada directamente con los contenidos de arena e inversamente con los de arcilla. Es decir, se espera una mayor infiltración en zonas donde exista mayor contenido de arena. Por otra parte, la capacidad de infiltración se encuentra relacionada con la densidad aparente y con la compactación. Al existir una mayor densidad aparente, existe mayor compactación y menos espacios por donde se movilice el agua. Del mismo modo, la capacidad de infiltración no es la misma en un suelo seco que en uno parcialmente húmedo. Al iniciar la precipitación el suelo seco presenta mayor capacidad de infiltración y a medida que se va hidratando va disminuyendo la velocidad o tasa de infiltración hasta tomar un valor constante. Ese valor constante es llamado infiltración básica y está regido por el flujo que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo saturado, llamado **conductividad hidráulica saturada (ks)** (Amoozegar, 1992).

La **capacidad de campo** es otra propiedad física del suelo que interviene en la capacidad de infiltración de los suelos. Se define como la cantidad de agua que puede retener el suelo en

contra de la gravedad pasadas 48 horas de un riego o precipitación (Comisión Europea. Dirección General de Agricultura, 2003). A mayor capacidad de campo, la tasa de infiltración inicial será mayor, puesto que el suelo tendrá mayor disposición de retener el agua. Es decir, el suelo no favorecerá la generación de flujo superficial.

Así como el agua que llega por precipitación al suelo es dividida entre infiltración y flujo superficial, el agua que entra por infiltración se divide en interflujo y el agua que desciende por percolación (Escolero-Fuentes, 2018). El **interflujo** es el agua que fluye sub-superficialmente en la parte más somera del suelo. Presenta principalmente un flujo lateral el cual sigue la morfología del lugar. El interflujo generalmente regresa a la superficie y se une al flujo superficial, por lo cual, el flujo superficial sumado al interflujo son consideradas escorrentías directas (Escolero Fuentes, 2018; Seiler y Gat, 2007).

El agua que no hace parte de la escorrentía directa, se moviliza por la zona no saturada del suelo influenciado por fuerza gravitatoria. A este proceso se le llama **percolación** (K. P. Seiler y Gat, 2007). Si la cantidad de agua que se moviliza por el suelo supera la capacidad de campo del mismo, el excedente se dirigirá a la zona saturada convirtiéndose en la **recarga** para aguas subterráneas (Campos, 1998).

El agua subterránea fluye constantemente por los **medios hidrogeológicos** hasta llegar las zonas de descarga natural como lo son arroyos, ríos, lagos, humedales y finalmente el mar (Escolero Fuentes, 2018). El tiempo de viaje de aguas subterráneas desde la recarga hasta la descarga puede durar desde meses hasta miles de años dependiendo de la componente del sistema de flujo al que pertenezcan (Escolero Fuentes, 2018).

Los **manantiales** son zonas de descarga de aguas subterráneas que crean un flujo sobre la superficie, los cuales posteriormente tributan en los arroyos o ríos y su ocurrencia se da por varias razones. Pueden ocurrir cuando el **nivel freático** (profundidad a la que se encuentra la zona saturada) se encuentra somero y se intercepta con la superficie topográfica (Kresic y Stevanovic, 2009). En zonas tectónicamente activas, donde se presenta dominio estructural, la fosa tectónica o graben en las cuales se desarrollan sistemas de fallas, generan zonas de menor presión y conductos que favorecen la descarga de aguas subterráneas en forma de manantiales (Kresic y Stevanovic, 2009). Cada tipo de roca en la cual el agua subterránea fluye, presenta una diferente capacidad de transportar el fluido, esta propiedad es la

**conductividad hidráulica.** Cuando existen cambios litológicos, de igual manera se presenta un cambio en la conductividad hidráulica, obligando al agua subterránea a cambiar de dirección. Si se encuentra cerca de la superficie se puede presentar descargar en manantiales (Kresic y Stevanovic, 2009).

### **7.3.1. Cambio de uso del suelo y su repercusión en la recarga**

El cambio de cobertura modifica las interacciones de los procesos hidrológicos y por lo tanto modifica las condiciones de recarga. La influencia del hombre sobre el agua subterránea inicia en el neolítico, cuando las primeras actividades agrícolas generaron un cambio en cobertura vegetal natural. Zonas deforestadas, cultivos, áreas desnudas y la introducción de sistemas de riego modifican los procesos de transpiración e infiltración del ciclo hidrológico natural. Del mismo modo, el desarrollo urbanístico altera la capacidad de infiltración del suelo y las condiciones atmosféricas (K. P. Seiler y Gat, 2007).

#### **7.3.1.1. Agricultura**

El cambio de cobertura vegetal por cultivos altera el flujo potencial de recarga modificando las tasas de evapotranspiración con consecuencias que varían según las condiciones climáticas y las técnicas agrarias que se utilicen. Podría aumentar la disponibilidad de agua para recarga, pues al arar la capa superficial del suelo reduce la escorrentía superficial, no existe pérdida de agua por interceptación y los requerimientos hídricos de los cultivos no se presentan durante todo el año. Los sistemas de riego pueden ser beneficiosos para el proceso de recarga. El riego puede mantener los suelos húmedos, lo que permitiría una mayor tasa de infiltración puesto que las necesidades hídricas del suelo ya se encuentran satisfechas (K. P. Seiler y Gat, 2007).

Por otra parte, los cultivos pueden generar mayor evapotranspiración debido a los sistemas de riego, provocando salinización y disminución del flujo de recarga. Además, el aumento en la demanda de agricultura ha generado el uso de máquinas pesadas, aplicación de fertilizantes, pesticidas y herbicidas que contribuyen a la compactación del suelo disminuyendo la porosidad del mismo y afectando negativamente el proceso de infiltración (K. P. Seiler y Gat, 2007)..

El aumento de la industrialización y la demanda de comida conlleva a la alteración de nuevas zonas naturales provocando deforestación. La deforestación aumenta el grado de escurrimiento, generando erosión y deterioro del suelo en zonas húmedas. Disminuyendo el proceso de infiltración y a su vez la recarga potencial de agua subterránea (K. P. Seiler y Gat, 2007).

#### 7.3.1.2. Área Urbana

Las áreas urbanas cambian significativamente la recarga de agua subterránea, introduciendo nuevos mecanismos de recarga y modificando los ya existentes. El bloqueo del suelo por capas impermeables, la liberación de agua y contaminantes para recarga local en distribuciones temporales diferentes del patrón natural, manipulación de cursos de ríos y concentración de precipitación por emisión de gases son algunas de las consecuencias del cambio de uso de cobertura natural a urbana (K. P. Seiler y Gat, 2007).:

- La impermeabilización impide los procesos de infiltración y evapotranspiración, aumenta los procesos de escorrentía disminuyendo las posibles recargas de los acuíferos y por lo tanto agota sus recursos.
- Las fugas o descargas de los sistemas de distribución pueden ser utilizados como posible recarga. Sin embargo, pueden liberar contaminantes en las fuentes de agua subterráneas.
- La modificación de los cursos de ríos, altera la velocidad de flujo en los cauces generando una desconexión entre acuífero y río disminuyendo la posible recarga.
- La expansión de las zonas urbanas modifica las zonas naturales de recarga y generan microclimas de mayor temperatura por sus emisiones y alta densidad aumentando la precipitación.

#### **7.4. Influencia de las fallas en los sistemas de flujo**

Las cargas hidráulicas y el nivel freático sirven para comprender el comportamiento del flujo de agua al pasar por una falla e identificar su funcionamiento (Bense et al., 2013). Las fallas pueden actuar como conductores, barreras o un sistema combinado que favorecen o disminuyen el flujo de agua según la estructura litológica y estructural que presente (Caine et al., 1996).

La densidad de permeabilidad y porosidad de la roca fallada se rigen primordialmente por la estructura de fracturas y ésta a su vez depende de la orientación, longitud, conectividad y apertura de las fallas (Bense et al., 2013; Caine et al., 1996). Caine et al. (1996) caracterizó los cambios de permeabilidad de la roca después de fracturamiento por procesos tectónicos. Para ello, definió las **zonas de falla**, las cuales son áreas que fueron afectados por la falla alterando su permeabilidad. Las zonas de falla están compuestas por el Núcleo de la falla y la Zona de daño. El **Núcleo de la falla** comprende la extensión o área que sufre el mayor estrés. Al ser zona de mayor estrés generalmente presenta procesos de cataclasis, brechas alteradas y zonas ricas de arcilla que conllevan a una disminución de la permeabilidad de la roca (Bense et al., 2013; Caine et al., 1996). La **zona de daño** es la zona que rodea el núcleo de la falla y presenta red de estructuras secundarias, como pequeñas fallas, fracturas y venas que mejoran la permeabilidad con respecto al núcleo y roca sin alterar (Caine et al., 1996).

El control primario de permeabilidad en la zona de falla es el contraste entre el núcleo de la falla y la zona de daño. Mientras que el núcleo de la falla está regido por el tipo de roca y tamaño de grano para definir su permeabilidad, la permeabilidad de la zona de daño está dominada por las propiedades hidráulicas de la red de fracturas (Caine et al., 1996). Alta densidad de fracturas en la zona de fallas se puede presentar por superposición de zonas de daño generados por diferentes periodos de estrés (Bense et al., 2013).

La densidad de fracturas y conectividad suele ser mayor en cercanías de la zona de falla puesto que la densidad de porosidad es mayor en la zona de falla en comparación con la roca caja (Bense et al., 2013).

La alteración de la roca puede generar procesos secundarios que modifiquen la permeabilidad de la roca. Al estar en contacto con el flujo de agua, la roca puede reaccionar precipitando minerales que es un proceso de cementación, disminuyendo la permeabilidad de la roca. Por el contrario, si la reacción genera disolución de la roca, se favorecería la permeabilidad de la misma (Bense et al., 2013).

Otro de los procesos secundarios que ocurre es la compactación; ocurre a medida que aumenta la profundidad debido a la carga litostática y el aumento de estrés. La compactación reduce la densidad de fracturas a profundidad, lo que disminuye la porosidad en los primeros

100 metros para rocas cristalinas (Bense et al., 2013). Del mismo modo, a mayor profundidad la cataclasis empieza a ocurrir, disminuyendo la permeabilidad de la roca (Bense et al., 2013).

Los modelos más aceptados para rocas cristalinas y siliciclásticas son baja permeabilidad en el núcleo de la falla, rodeado por una zona de mayor permeabilidad en la zona de daño y una impermeabilidad intermedia en el protolito o roca sin alterar (Caine et al., 1996; Walker et al., 2013). Sin embargo, en rocas volcánicas básicas, como basaltos y basaltos andesíticos, el modelo puede verse invertido, siendo las zonas de bajo estrés, zonas de baja permeabilidad y las zonas de alto estrés, el lugar donde más se favorece el flujo de agua en la roca (Walker et al., 2013).

La porosidad de las rocas volcánicas básicas aumenta en el enfriamiento debido a la generación de micro fracturas. La partición permite el flujo de agua transitorio, lo cual conlleva a la aparición de arcilla. A medida que ocurre el proceso de fracturamiento por el incremento de estrés el flujo de agua en la roca va aumentando facilitando la precipitación de zeolitas y calcitas en las venas. Sin embargo, al tratarse de un estrés débil, no existe interconexión entre venas o se encuentran separadas por arcillas disminuyendo la permeabilidad en la zona de daño. En la zona de alto estrés (núcleo de la falla), el desplazamiento y la alteración reduce o incluso desaparece la arcilla y ocurre la conexión entre fracturas y venas rellenas de zeolita y calcita que mejoran la permeabilidad del núcleo de la falla (la presencia de Zeolita y calcita indican conectividad y porosidad efectiva) (Walker et al., 2013).

El enfriamiento de rocas básicas puede generar fracturas que van desde el milímetro hasta los 30 metros, incrementando su densidad de fracturas en las partes altas o en los márgenes de los diques (Walker et al., 2013). La permeabilidad paralela generalmente es mayor que la normal (Walker et al., 2013).

### **7.5. Modelos hidrológicos**

Los modelos son representaciones generalizadas que buscan simular el comportamiento del agua en el ciclo hidrológico. Los modelos buscan caracterizar los factores o variables que influyen en el movimiento del agua desde que se precipita, hasta que se deposita en cuerpos de agua como son lagos y mares (Jorquera, 2012). Debido a la complejidad de la naturaleza,

se hace necesario el uso de modelos conceptuales, los cuales simplifican los aspectos físicos y químicos que rigen el flujo del agua (Holzbecher y Sorek, 2006).

El objetivo de los modelos hidrológicos es ayudar a la solución práctica de problemas, mejorando el entendimiento del funcionamiento del sistema hidrológico y a su vez, buscando predecir su respuesta a distintos posibles escenarios futuros (Holzbecher y Sorek, 2006).

En general la realización de un modelo pasa por las fases de pre procesamiento, cálculos numéricos, calibración y validación. El pre procesamiento es la transformación de la información en el formato requerido para poder ser aplicados los algoritmos matemáticos incluyendo el mallado. Los cálculos numéricos son los modelos numéricos utilizados para encontrar la solución que mejor converja al modelo matemático. La calibración es utilizada para modificar de una manera óptima los valores de las variables independientes con el fin de aproximarse a los valores reales obtenidos en campo. Finalmente, la validación consiste en evaluar qué tan bien simula el modelo el sistema hidrológico por medio de la comparación con observaciones en campo (Holzbecher y Sorek, 2006).

### **7.5.1. Modelación Lluvia-Escorrentía**

La simulación de la cantidad de agua que proviene de precipitaciones y termina como escurrimiento superficial dentro de una cuenca es el objetivo de los modelos lluvia-escorrentía. Para una buena simulación es indispensable tener en cuenta parámetros hidrológicos como la intensidad de la lluvia, evapotranspiración, geomorfología de la cuenca, infiltración del agua en el suelo y la relación entre agua superficial y subterránea (Kumar et al., 2016). Los modelos Lluvia-Escorrentía buscan representar la fase terrestre del ciclo hidrológico estableciendo un balance hídrico entre entradas, almacenamiento y salidas de la cuenca (Velázquez, 2015).

En el presente proyecto se utilizó el programa SWAT para desarrollar el modelo lluvia-escorrentía.

#### **7.5.1.1. SWAT**

El software Soil Water Assessment Tool (SWAT) fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto de la Universidad de Texas con el objetivo de

establecer la incidencia que genera el manejo y uso del suelo en la producción de agua, sedimentos y químicos en cuencas con unidades de suelo heterogéneas (Arnold et al., 2012).

SWAT divide la cuenca en subcuencas para facilitar la modelación y dentro de ellas crea Unidades Hídricas de Respuesta (HRU en inglés). Las Unidades Hídricas de Respuesta son subdivisiones de las subcuencas en áreas que relacionan uso del suelo, tipo de suelo y pendiente (Arnold et al., 2012).

Para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, SWAT realiza un balance hídrico a partir de la ecuación de equilibrio del agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum R_{dia} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw}$$

*Ecuación 1. Cálculo del contenido final del suelo (Arnold et al., 2012).*

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo,  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el suelo en un día,  $t$  es el tiempo en días,  $R_{dia}$  es la cantidad de precipitación en un día,  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día,  $Ea$  es la cantidad de evapotranspiración en un día,  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que entra de la zona vadosa y  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en un día.

Conceptualmente para SWAT, la escorrentía ocurre cuando la precipitación es mayor que la capacidad de infiltración que presenta el suelo (Uribe, 2010). Al iniciar la precipitación y dependiendo de las condiciones de humedad previas a la lluvia, el agua empieza a infiltrarse para saciar las necesidades hídricas del suelo (infiltración inicial). Posteriormente, la tasa de infiltración empieza a disminuir hasta tomar un valor constante. Si la precipitación continua hasta lograr que se supere la capacidad de campo del suelo, ocurrirá el escurrimiento. El sistema lograra un estado de equilibrio en el cual una parte se infiltrará y otra escurrirá al tiempo (Velázquez, 2015). La ecuación que describe la relación existente entre precipitación, escurrimiento e infiltración que utiliza SWAT es:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{dia} - I_a)^2}{(R_{dia} - I_a + S)}$$

*Ecuación 1. Cálculo del escurrimiento superficial (Arnold et al., 2012).*

Donde  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día,  $R_{dia}$  es la cantidad de precipitación en un día,  $I_a$  es la infiltración inicial también conocida como abstracción y  $S$  es la abstracción final (usualmente,  $I_a = 0.2S$ ).

La ecuación utilizada por SWAT para el cálculo de la abstracción total involucra el número de curva (Ecuación 2. Cálculo de la abstracción total). El número de curva (CN) es un valor asignado al suelo de acuerdo con las propiedades físicas del mismo y que expresa su facilidad de generar escorrentía. El número de curva depende de la profundidad del suelo, textura, capacidad de infiltración y el estado de humedad previa a la precipitación del suelo (Arnold et al., 2013).

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

*Ecuación 2. Cálculo de la abstracción total (Arnold et al., 2012).*

El estado de humedad indica si el suelo se encuentra en punto de marchitez, capacidad de campo o un nivel intermedio. Si el suelo se encuentra en punto de marchitez el número de curva será mayor. Por el contrario, si el suelo se encuentra a capacidad de campo el número de curva será menor lo que implica una menor capacidad de generar escurrimiento.

Otro factor importante que modifica el número de curva es la pendiente, si la pendiente es mayor al 5% se requiere realizar el siguiente ajuste:

$$CN_{25} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} * [1 - 2 \exp(-13.86 * slp) + CN_2]$$

*Ecuación 3. Ajuste del número de curva por pendiente (Arnold et al., 2012).*

Donde  $CN_{25}$  es el número de curva del suelo ajustado,  $CN_3$  y  $CN_2$  son los números de curva a capacidad de campo y punto de marchitez y  $slp$  es el valor de la pendiente topográfica en dicho suelo (Arnold et al., 2013).

El modelo SWAT permite escoger entre tres métodos para estimar la evapotranspiración potencial, paso previo para el cálculo de la evapotranspiración real. Los métodos son Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor (Velázquez, 2015). Sin embargo, si el usuario requiere o gusta utilizar un método diferente, el programa permite ingresar los valores de evapotranspiración (Arnold et al., 2012)

Para que el agua pase a la zona vadosa y a su vez sirva como recarga de aguas subterráneas se requiere que ocurra el proceso de percolación. Conceptualmente, SWAT establece que la percolación solo ocurrirá si el contenido de agua excede la capacidad de campo y la capa infrayacente no se encuentra saturada. Si el nivel de agua supera la capacidad de campo, el fluido se movilizará ocupando los poros que se encuentran con aire. Si el suelo se encuentra saturado la dirección preferencial de la percolación será hacia abajo puesto que no existe otras direcciones posibles para su desplazamiento. Por el contrario, si el suelo no se encuentra saturado la percolación ocurrirá en cualquier dirección (Arnold et al., 2013).

El flujo lateral será importante en capas de alta conductividad hidráulica, superficiales y que presenten capas impermeables o semipermeables a profundidades someras (Uribe, 2010).

El agua que proviene de la zona vadosa servirá de recarga para el flujo de aguas subterráneas. El modelo SWAT genera dos componentes del sistema o “acuíferos”. Una componente somera que será la contribución de agua subterránea al flujo total siempre y cuando la cantidad de agua exceda el umbral especificado por el usuario. Para este aporte existe una constante de recesión la cual retarda la llegada del flujo de la componente somera a la corriente de agua (Velázquez, 2015). Y una componente más profunda con una presión mayor a la atmosférica (“acuífero confinado”) la cual recibe un porcentaje de recarga del agua que pasa del perfil a la zona vadosa. La recarga de ambos acuíferos en un día dado es calculada así:

$$Wrchrg_i = \left(1 - \exp\left[\frac{-1}{\delta gw}\right]\right) \cdot Wseep + 1 - \exp\left[\frac{-1}{\delta gw}\right] \cdot Wrchrg_{i-1}$$

*Ecuación 4. Recarga para ambos acuíferos (Arnold et al., 2012).*

Donde  $Wrchrg_i$  es la recarga que ingresa a los componentes en un día,  $\delta gw$  es el tiempo de demora o de desagüe de las formaciones geológicas sobreyacentes,  $Wseep$  es la cantidad de agua que sale del fondo del perfil y  $Wrchrg_{i-1}$  es la recarga que entró a los acuíferos el día anterior.

La recarga de agua que llega al componente más profundo es calculada al multiplicar el coeficiente de percolación por el valor de recarga (Arnold et al., 2013). Por otra parte, la recarga que llega al componente somero se calcula restando la recarga del componente más profundo contra la recarga total (Arnold et al., 2013).

$$W_{deep} = \beta_{deep} * Wrchrg_i$$

*Ecuación 5. Recarga de componente profundo (Arnold et al., 2012).*

$$Wrchrg_{sh} = Wrchrg_i - W_{deep}$$

*Ecuación 6 Recarga de componente somero (Arnold et al., 2012).*

Donde  $W_{deep}$  es la recarga del componente más profundo,  $\beta_{deep}$  es el coeficiente de percolación,  $Wrchrg_i$  la recarga total y  $Wrchrg_{sh}$  la recarga del componente más somero.

## **8. Área de estudio**

### **8.1. Suelo de Conservación de la Ciudad de México**

Se denomina Suelo de Conservación a aquellas zonas que proveen servicios ambientales como preservación de la biodiversidad, el mantenimiento del ciclo hídrico, la captura de carbono, la recreación, entre otros que mejoran la calidad de vida (Cram et al., 2008; Saavedra et al., 2011). Así mismo, suelos destinados a la producción agropecuaria, piscícola, forestal, agroindustrial, turística y poblados rurales, por lo que no está permitido el desarrollo urbano (GDF, 2010).

La primera categorización de Suelo de Conservación de la Ciudad de México ocurrió en 1987 como “Protección Natural”. Posteriormente la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) la denominó “Suelo de Conservación” en el año 1996 (GDF, 2010). El Suelo de Conservación comprende los promontorios, cerros, zonas de recarga natural de acuífero, colinas, elevaciones y depresiones orográficas, y todo aquel elemento natural dentro del territorio. Del mismo modo, zonas que representen peligros permanentes o accidentales para los asentamientos urbanos debido a fenómenos naturales o por explotaciones (GDF, 2010). Ocupa el 58.9% del territorio al sur de la Ciudad de México y contiene una gran variedad de especies endémicas de flora y fauna. Es considerado una zona estratégica debido a su alto valor, ambiental, productivo y cultural (Perevochtchikova y Torruco, 2014).



Figura 8-1. Suelo de Conservación de la Ciudad de México (GDF, 2012).

En la Figura 8-2 se observa el área final en la cual se trabajó. Dentro del área de estudio se encuentra una porción de la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico Chichinautzin. La delimitación del área de estudio se basó en la delimitación de subcuencas a partir del modelo elevación digital de terreno (INEGI, 2019c).

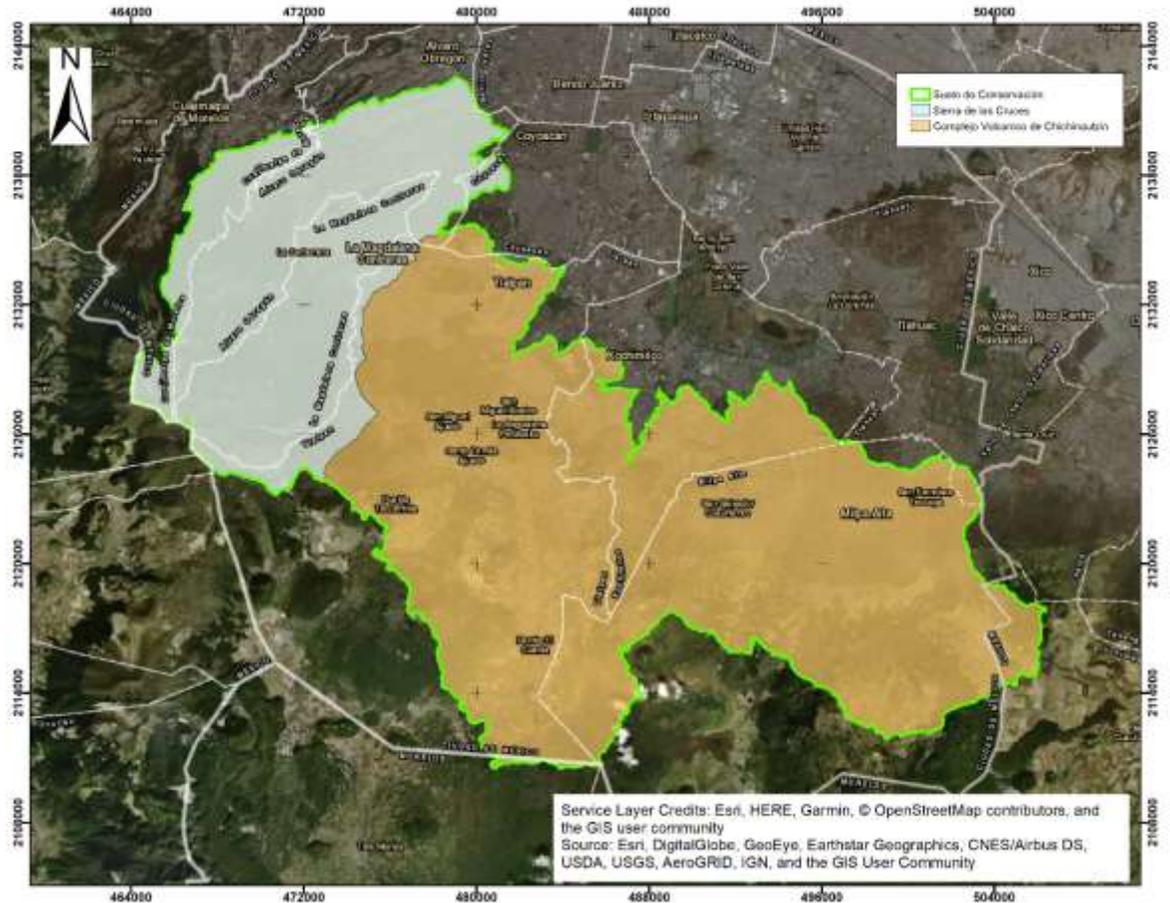


Figura 8-2 Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Modificado de (INEGI, 2019c).

## 8.2. Servicios ecosistémicos

Entre los servicios ecosistémicos que proporciona el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, se encuentran la disminución de los niveles de contaminación, reservorio de biodiversidad, regulación de microclima, producción agropecuaria y rural, entre otros. También destaca como servicio, el suministro de agua, ya que es la fuente de recarga principal del sistema de flujo de la cuenca de México (60 a 70 % aproximadamente). Además, los pueblos rurales y áreas urbanas de la parte sur de la Ciudad de México, se ven beneficiados por los manantiales presentes en la zona (Almeida-Leñero et al., 2007; Escolero et al., 2009; GDF, 2012; Perevochtchikova y Vázquez Beltrán, 2010).

## 8.3. Clima

La extensión de La Cuenca de México provee a la región diferentes climas en su interior. La Cuenca de México recibe una exposición prolongada al sol durante todo el año, debido que

se encuentra en una zona intertropical. Estas condiciones provocan valores altos en temperatura ambiente los cuales se ven amainados por la altitud y el relieve. Por esta razón la parte sur de La Cuenca de México presenta un clima templado subhúmedo y en la zona central un clima seco semiárido. La temperatura media anual promedio es de 16 °C, presentando temperaturas mayores a los 25 °C en los meses de marzo a mayo y menores a los 5 °C en diciembre y enero (GDF, 2012).

Para la zona correspondiente al Suelo de Conservación de La Ciudad de México, existe un microclima del cual depende el funcionamiento natural de los ecosistemas y el ciclo hidrológico de la Cuenca de México. En las últimas décadas la pérdida de cobertura natural en el suelo de conservación ha generado aumentos de la temperatura promedio y modificación en el inicio de lluvias, afectando el ciclo hidrológico (GDF, 2012).

La precipitación media anual para el suelo de conservación oscila entre 1500 y 600 mm al año, presentándose el régimen de lluvias en verano. Las mayores precipitaciones se presentan en el mes de julio y las menores en los meses de enero y febrero (GDF, 2012).

#### **8.4. Geología**

La Cuenca México pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana. Se considera una provincia fisiográfica independiente, limitada por elevaciones topográficas de origen volcánico como son la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al poniente, la Sierra del Chichinautzin al sur, y la Sierra Nevada al oriente (GDF, 2012).

Geológicamente está constituido por intercalaciones de material volcánico con aluviones en la parte central del Valle, por arcillas y lacustres. Las rocas que conforman el subsuelo corresponden a una intercalación de productos volcánicos y materiales granulares transportados por ríos; son en su gran mayoría permeable (GDF, 2012).

En el Suelo de Conservación de la Ciudad de México geológicamente afloran en superficie la secuencia volcánica de la Sierra de las Cruces, el Complejo volcánico de Chichinautzin, Derrames del Xitle y depósitos lacustres (Arce et al., 2019; Canteiro et al., 2019).

**La secuencia volcánica de la Sierra de las Cruces** hace referencia a una serie de estructuras volcánicas alineadas en dirección NNW-SSE y se localiza al costado oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano entre las cuencas de México y Toluca. Consta de 8 estratovolcanes

traslapados que se distribuyen de norte a sur, siendo La Catedral, el estratovolcán ubicado más al Norte y el más viejo ( $3.71 \pm 0.40\text{Ma}$ ); por su parte, los estratovolcanes San Miguel, La Corona y Zempoala se ubican en la parte más sur y presentan una edad entre 0.68 a 1.79 Ma (García-Palomo et al., 2008). Los flujos de lava y formación de domos de composición andesítica- dacítica predominan en las partes más altas de las estructuras, mientras que en la parte inferior del relieve se encuentran depósitos piroclásticos, intercalados con lahares y depósitos de avalanchas (Arce et al., 2019).

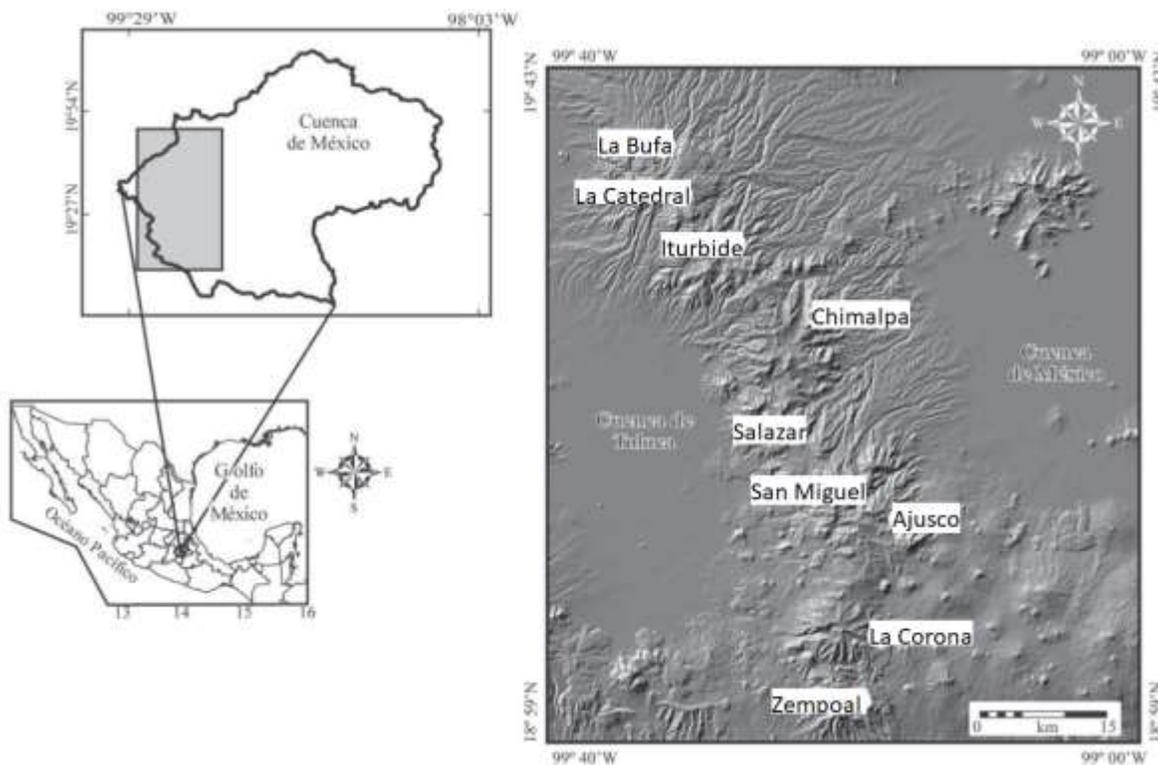


Figura 8-3 Sierra de las Cruces. Tomado de (García-Palomo et al., 2008)

La Sierra de las Cruces presenta tres sistemas de fallas principales N-S, NE-SW y E-W. La zona de fallas Norte-Sur es el sistema más antiguo presente en la Sierra de las Cruces, es el responsable del alineamiento de los estratovolcanes, y de la orientación general que presenta la Sierra. Fallas características representativas de este sistema son la falla Tula-Mixhuca y las fallas de Ayotuzco, las cuales conforman una semifosa dentro de la sierra de las cruces (García-Palomo et al., 2008).

Las fallas NE-SW presentan un rumbo general entre  $N45^{\circ}E$  a  $N65^{\circ}E$ , aunque también es común encontrar tendencia  $N20^{\circ}E$ . En la parte Norte se encuentra la zona de fallas La

Catedral la cual se nombró de esa manera ya que corta los flujos piroclásticos del estratovolcán La Catedral. En la parte central de la Sierra de las cruces se encuentra la fosa de las Lomas orientada N53°E, la cual se encuentra limitada por la falla Satélite y la falla Contreras cuyos buzamientos son SE y NE respectivamente (García-Palomo et al., 2008).

El sistema de fallas E-W son zonas de fallas de longitudes cortas que afectan a rocas del Mioceno y Pleistoceno. Sobresalen las fallas de Ixtlahuaca, Falla Tenango, Falla de Xochimilco, Falla Xicomulco y Falla la Pera entre otros. Permiten delimitar los bloques propuestos por García-Palomo et al., (2008) donde establece de acuerdo a las propiedades morfoestructurales y geológicas, una división en bloques Norte, Centro y Sur de la Sierra de las Cruces. La Falla De Otómi propuesta por Palomo correspondería a el límite entre los Bloques Norte y Centro. Del mismo modo las Fallas Xicomulco, Xochimilco y Tenango serían el límite entre el Bloque Centro y Sur.

De acuerdo el área delimitada del suelo de conservación la parte correspondiente de la sierra de las cruces es el Bloque Sur; específicamente la zona que comprende entre la Falla Satélite y el Volcán La Corona.

El **Complejo Volcánico Chichinautzin** se encuentra ubicado en el frente Sur de la Faja Volcánica Transmexicana, en la parte sur de la Cuenca de México. Presenta una orientación E-W, y está asociado a procesos de subducción entre la placa de Cocos y la placa de América del Norte (Arce et al., 2019). Agrupa más de 220 estructuras volcánicas monogenéticas con edades que varían entre 1.2 (Arce et al., 2013) a 0.0016 (Siebe, 2000). Las composiciones de las lavas van desde basaltos hasta andesitas, y se han reportado dacitas, aunque los basaltos andesíticos predominan (Arce et al., 2019).

Estructuralmente, se reporta un sistema de falla predominante, el cual presenta un rumbo E-W. Las fallas más representativas de este sistema son la Falla de Xicomulco, Falla de Xochimilco y Falla La Pera. Al norte de la falla de Xicomulco y al sur de la Falla Santa Catarina se encuentra la semifosa Tláhuac-Tulyehualco. Entre la Falla la Pera y la semifosa Tláhuac-Tulyehualco se presenta un alto topográfico, denominado el pilar de Chichinautzin (García-Palomo et al., 2008).

Si bien los **Derrames del Volcán del Xitle** hacen parte del Complejo Volcánico Chichinautzin, se decidió diferenciarlo ya que la información existente permite separarlo espacial y litológicamente del resto. Se encuentra ubicado al sur de la Ciudad de México y es uno de los volcanes más jóvenes en el Complejo Volcánico (Delgado et al., 1998). Los derrames del volcán comprenden flujos piroclásticos, cono de lava y 7 flujos de lava. Los flujos de lava tienen una composición basáltica (Delgado et al., 1998).

Finalmente, se encuentran los **depósitos lacustres**, los cuales presentan edades desde 0.22Ma, se ha reportado la presencia de estos depósitos en profundidades desde los 700 metros intercalados con depósitos volcánicos (Arce et al., 2013).

### **8.5. Edafología**

Dentro del suelo de conservación predominan los suelos de tipo Andolsoles. Son suelos que presentan un horizonte superficial oscuro ya que están formados por materiales ricos en vidrio volcánico. Los Feozems son otro tipo de suelo presente en el área de estudio. Son ricos en materia orgánica y pueden soportar cualquier tipo de vegetación en condiciones normales. Los Litosoles son suelos de poco desarrollo con roca dura que se localiza a poca profundidad del suelo. Se presentan en todos los climas y presentan diversos tipos de vegetación. Otros tipos de suelos presentes en el suelo de conservación de la Ciudad de México son los Regosoles, Gleysoles, Solonchaks, Cambisoles, así como Fluvisoles y Luvisoles con menos de 1% de superficie (GDF, 2012; INEGI, 2019a).

## **9. Metodología**

Para cumplir con los objetivos trazados, se definieron 4 etapas de desarrollo las cuales se pueden observar en la Figura 9-1. La fase 1 corresponde a la adquisición de información tanto de gabinete como de campo y la identificación de los insumos faltantes para la realización del modelo. La Fase 2 se centra en el uso de nuevas alternativas para suplir la información faltante en los insumos recolectados en la Fase 1. En la Fase 3 se desarrolló el modelo geológico conceptual y el modelo hidrológico de lluvia escurrentía con el programa SWAT. Posteriormente, se calibró el modelo teniendo en cuenta el modelo hidrológico conceptual ya realizado y los valores obtenidos en la Fase 1 y 2. Con el modelo calibrado se corrió un escenario hipotético y se observó el cambio en la recarga. Finalmente. En la fase 4 se analizaron los resultados y se emitieron las conclusiones.

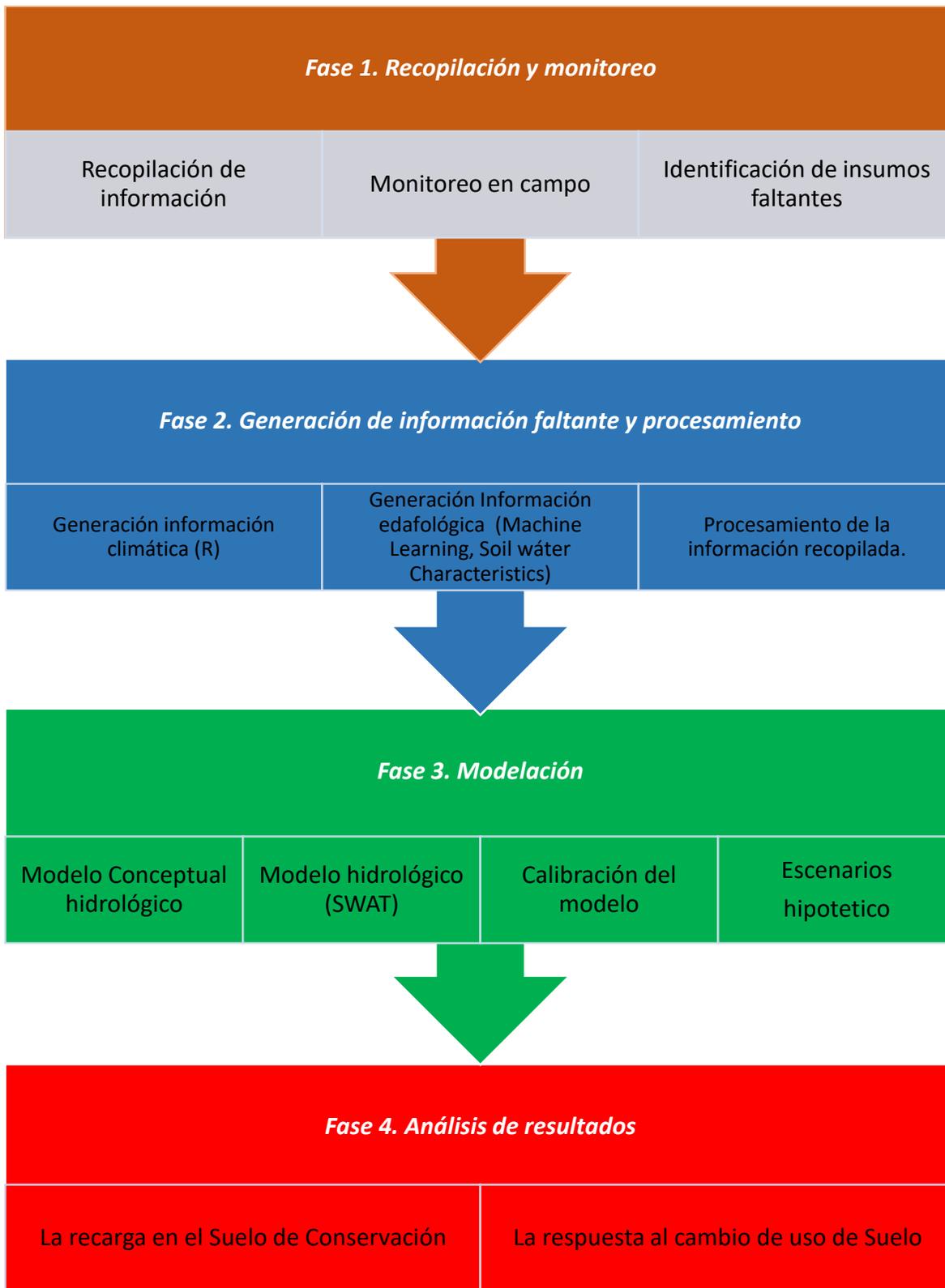


Figura 9-1 Metodología aplicada.

## **9.1. Fase 1. Recopilación y monitoreo.**

### **9.1.1. Recopilación de información**

De acuerdo a Torres et al., (2000) la información requerida de la cuenca por el programa SWAT es la Topografía, Uso del suelo, Edafología, Hidrología y Climatología. Además, para la realización del modelo hidrológico conceptual se requiere la información geológica y estructural del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Por esta razón, en esta etapa se realizó una revisión bibliográfica de los distintos autores que han generado conocimiento sobre la geología, los patrones estructurales y el comportamiento hidrológico de la zona. Del mismo, se solicitó y adquirió información oficial de la zona de estudio que sirvan como datos de entrada para el modelo en SWAT.

### **9.1.2. Monitoreo en campo**

De los manantiales identificados en el estudio de evaluación y aprovechamiento del sistema de manantiales de la Ciudad de México realizado por el GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS (2018), se escogieron 11 manantiales representativos de la zona de estudio para ser monitoreados por un año. La selección se llevó a cabo teniendo en cuenta que fueran perenes, y cercanos por cuestiones de logística. Sin embargo, aunque existieron limitaciones a la hora de escogerlos los puntos a monitorear, se lograron incluir manantiales de la partes altas, medias y bajas de las subcuencas logrando la representatividad deseada. Del mismo modo, se escogieron los Ríos Magdalena, Viborillas y Eslava para ser monitoreados (Figura 9-2).

En los sitios seleccionados se calculó el caudal (Q) a partir de mediciones de velocidad de flujo (q) y áreas(A) o secciones por donde pasa el agua (Ecuación 7). La velocidad de flujo de ríos y manantiales se midieron por medio de un flujometro y para el área de los cauces se utilizó cinta métrica.

$$Q = q * A$$

*Ecuación 7 Calculo de caudal (Freeze y Cherry, 1979)*

Se instalaron 3 sensores en los ríos para tener el registro cada hora durante un año del cambio de caudal. El sensor mide datos de presión, temperatura y conductividad, todos ellos son de interés, sin embargo, el más importante es el de presión ya que es por medio de éste, se puede

saber cuál es el tirante de agua del sitio y posteriormente mediante la ecuación de presión hidrostática calcular el caudal de los cauces.

De los tres sensores, 2 presentan registros completos desde el día 03/08/2019 hasta el 13/08/2020 (Viborillas, Eslava) y el sensor del Río Magdalena tiene registro desde el 24/09/2019 debido a que fue robado el primer sensor.

El propósito del monitoreo de manantiales y ríos es conocer la variación del caudal durante el año. El conocimiento de la variación sirvió como medida de control para realizar el proceso de calibración del modelo hidrológico y para mejorar el modelo conceptual hidrológico.

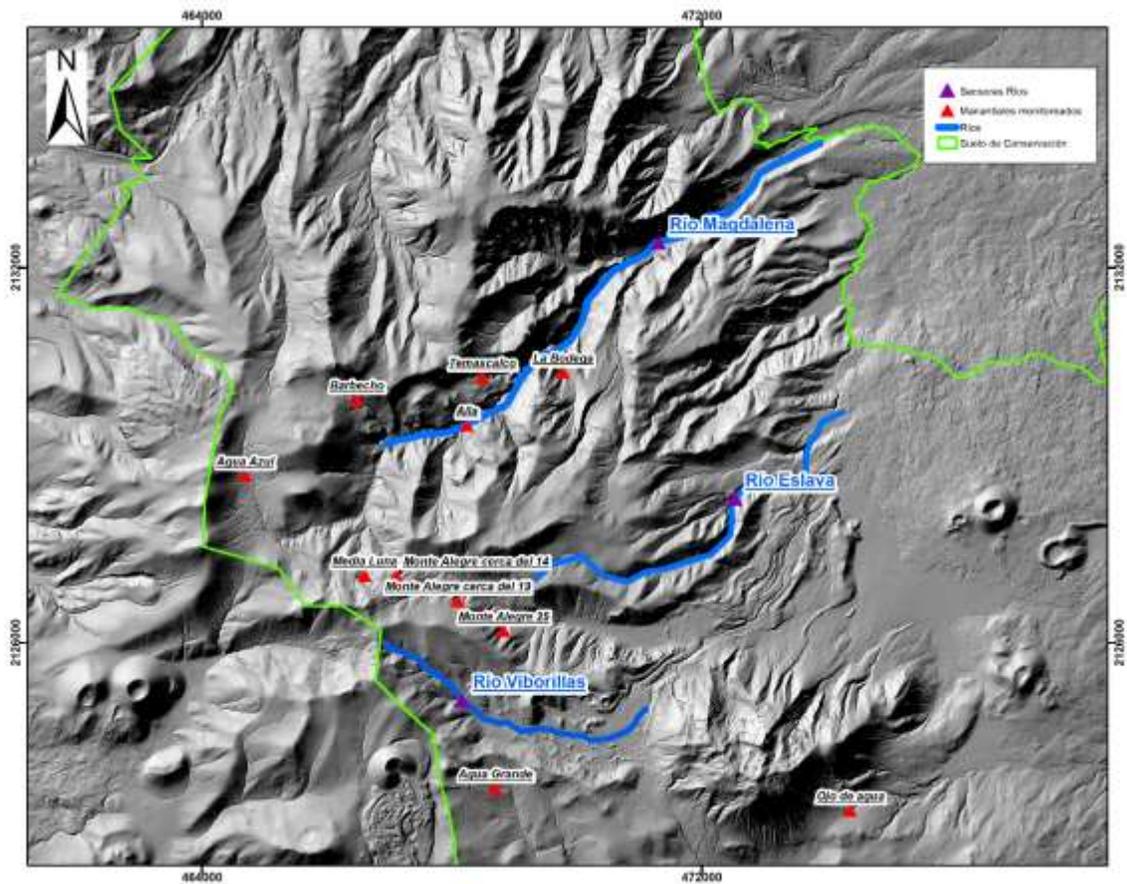


Figura 9-2 Manantiales y Ríos monitoreados. Modificado de (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c)

Por razones de logística se hizo imposible monitorear todos los manantiales reportados por GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS (2018). Por lo tanto, con la intención de estimar el aporte de los manantiales presentes en la Sierra de Las Cruces, se agrupó a cada manantial monitoreado, manantiales no monitoreado. Esta asociación se

realizó teniendo en cuenta la cercanía al manantial monitoreado y que la altura con respecto al nivel del mar fuera similar. En la Figura 9-3 se observa la asociación de manantiales (círculos morados) y su localización dentro de las subcuencas (números en azul) definidas para el proyecto. Los manantiales monitoreados se encuentran en rojo y los no monitoreados en azul. El cálculo que se realizó fue asignar el mismo valor de caudal de los manantiales monitoreados a los grupos no monitoreados y posteriormente se sumaron.

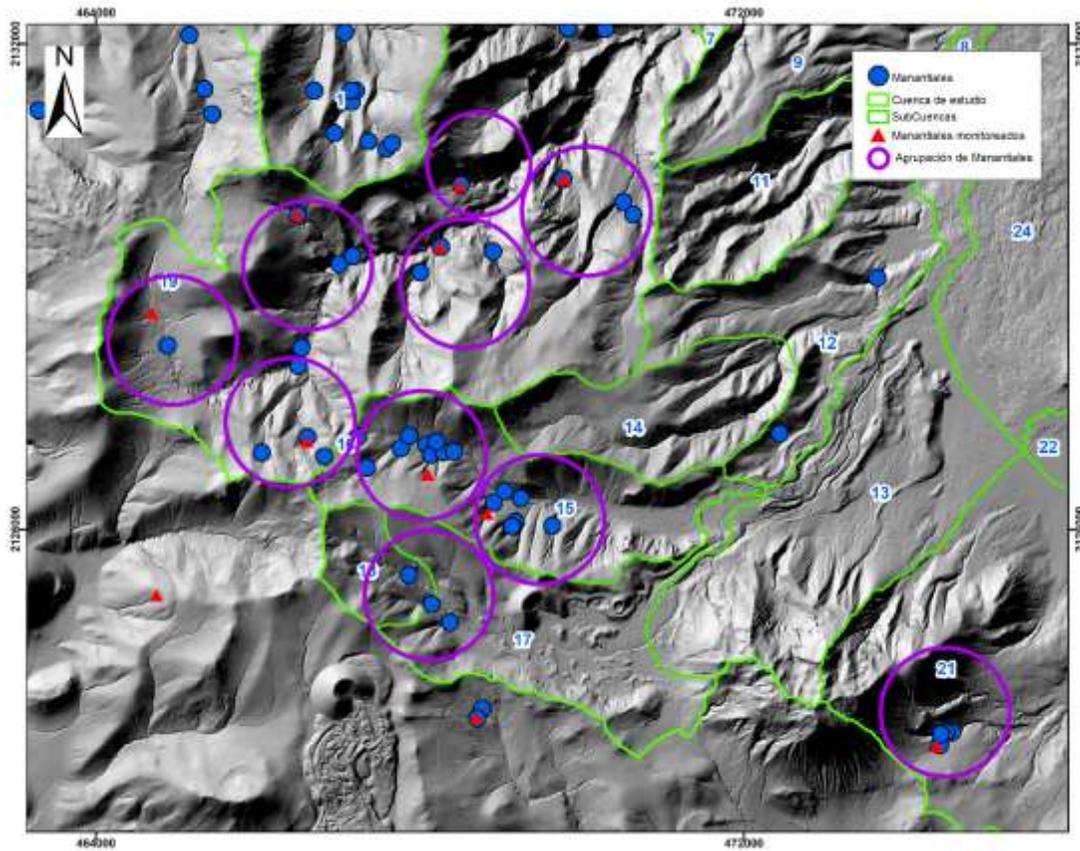


Figura 9-3 Agrupamiento de manantiales (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c).

## 9.2. Fase 2. Generación de información faltante y procesamiento

En la fase 1 se identificó vacíos en la información climática. De igual manera, se identificó la ausencia de parámetros edafológicos necesarios como datos de entrada para la realización del modelo en SWAT como lo son propiedades hidráulicas y profundidades del suelo. Por lo tanto, en esta etapa se utilizaron nuevas tecnologías para generar dicha información a partir de información secundaria.

### 9.2.1. Generación información climática (R)

Para los valores de precipitación y temperatura se escogieron las estaciones climáticas que se encuentran dentro y fuera del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Se escogieron 16 estaciones climáticas las cuales se pueden observar en el **¡Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.** y sus nombres en la Tabla 9-1.

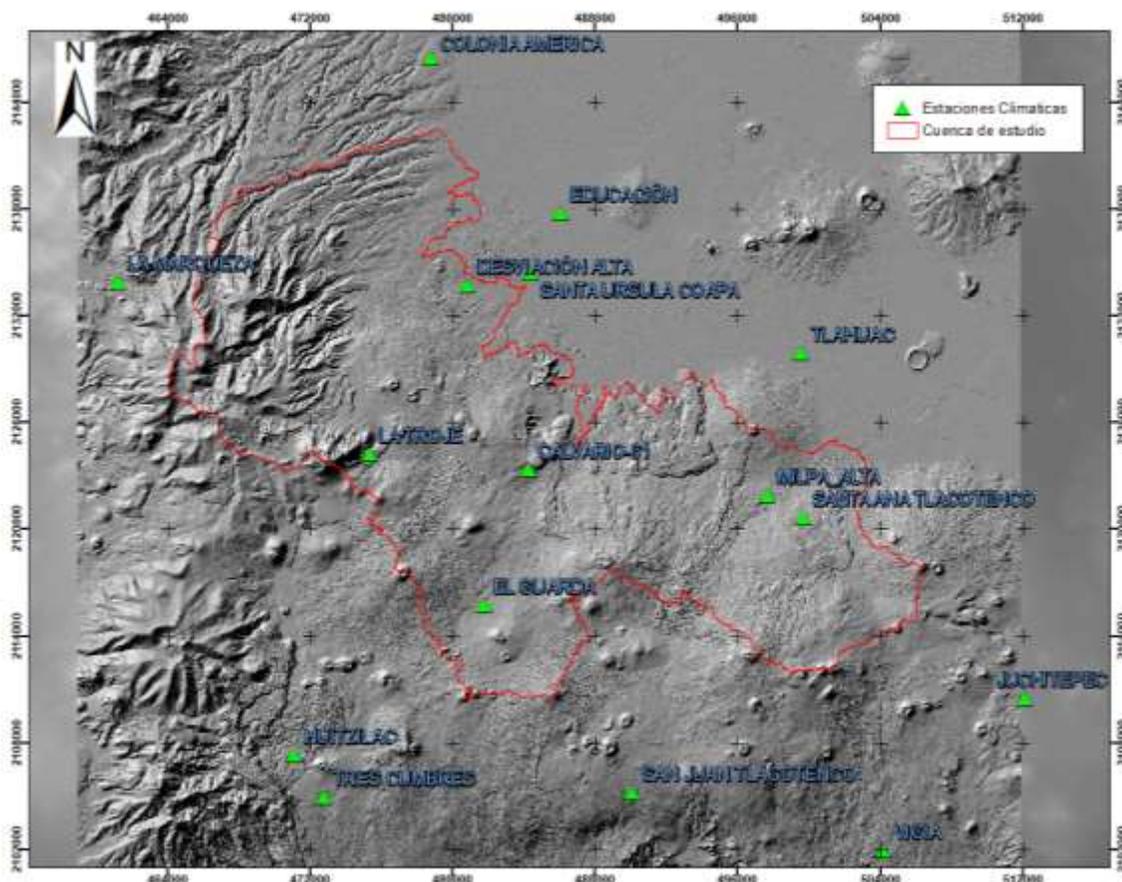


Figura 9-4 Estaciones Climáticas (CONAGUA, 2020)

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
Desviación Alta	480857.7	2133689.4	2284.8

El Guarda	481795.9	2115707.6	2996.9
Calvario-61	484315.9	2123307.0	2720.9
Milpa Alta	497697.7	2121917.3	2424.6
Santa Ana Tlacotenco	499705.6	2120622.5	2577.9
Tláhuac	499621.7	2129906.1	2231.5
Santa Úrsula Coapa	484440.9	2134394.1	2242.8
Vigía	504209.7	2101934.4	2153.0
Colonia América	478823.9	2146483.1	2300.6
Juchitepec	512129.0	2110446.8	2538.0
Huitzilac	471150.5	2107300.8	2795.7
La Marqueza	461274.4	2133908.6	3035.2
Tres Cumbres	472840.9	2104908.2	2633.9
San Juan Tlacotenco	490119.3	2105167.5	2826.3
Educación	486113.9	2137778.7	2234.8
La Troje	475392.0	2124221.0	3186.0

*Tabla 9-1. Estaciones Climáticas (CONAGUA, 2020)*

La información climática de las estaciones fue suministrada por CONAGUA y se generó una base de datos con información diaria de precipitación, temperatura máxima y mínima para el periodo comprendido desde 01/01/2015 hasta 04/30/2019. Sin embargo, la información suministrada presenta muchos vacíos en sus series de tiempo y no cubre el periodo de toma de datos de campo que fue entre 08/03/2019 y 13/03/2020. Por tal motivo, se utilizó el paquete Reddprec en lenguaje R el cual permite realizar un control de calidad de los datos, una reconstrucción de los valores faltantes y la generación de nuevas series para lugares específicos deseados a partir de un análisis correlativo que tienen en cuenta la cercanía y la altura de las estaciones (Serrano-Notivoli et al., 2017). Para su correcto funcionamiento, es necesario que para el día en cuestión exista por lo menos la información de 11 estaciones y es aconsejable definir un límite en la distancia de búsqueda de estaciones cercanas (Serrano-Notivoli et al., 2017), en esta ocasión se definió 20 km.

Debido a que no se tiene datos climáticos diarios del periodo de monitoreo, se utilizó la información climática mensual de las estaciones localizadas dentro y fuera del área de estudio disponible de la página web de CONAGUA (2020). Sin embargo, como SWAT trabaja con datos diarios, se utilizaron valores promedios diarios para correr el modelo.

### 9.2.2. Generación información edafológica (Machine Learning, Soil wáter Characteristics)

El tipo de suelo se obtuvo a partir de las cartas edafológicas a escala 1:50000 del INEGI (INEGI, 2019a). Al encontrarse en formato pdf, se digitalizaron las cartas, y se generó un archivo en formato shape.

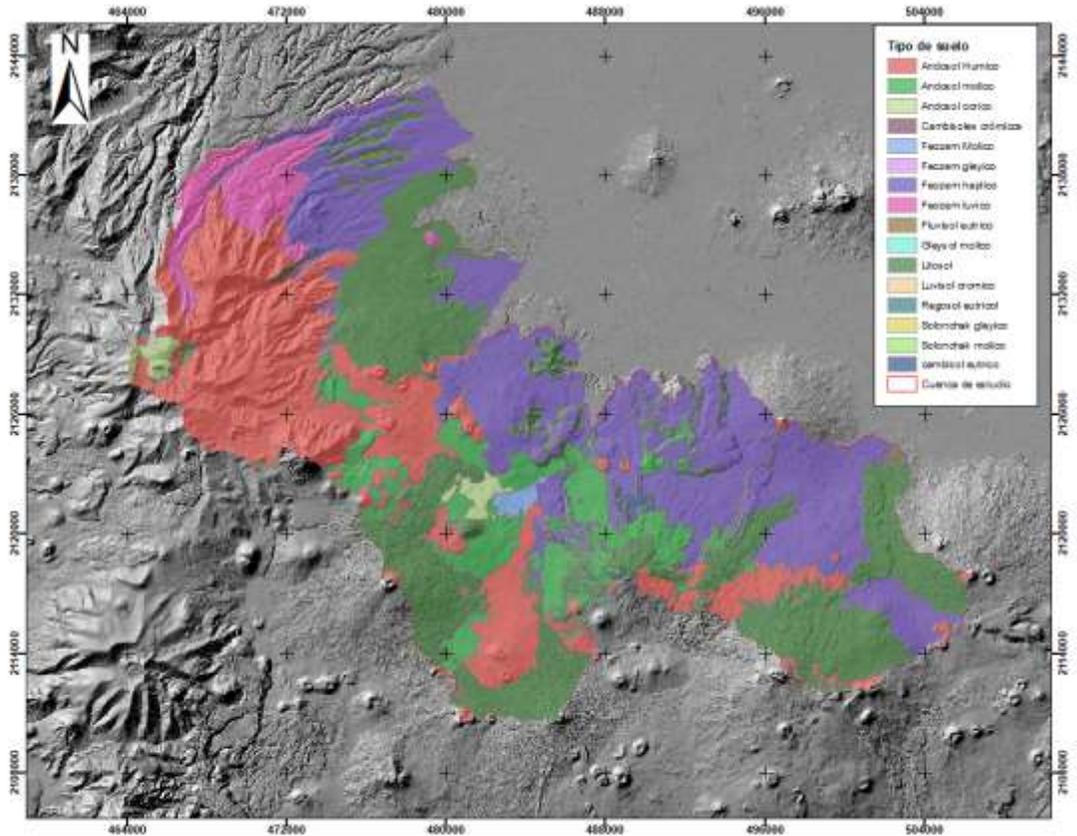


Figura 9-5 Tipo de Suelo Modificado de (INEGI, 2019a)

Sin embargo, las cartas edafológicas de INEGI están basadas en la clasificación de la FAO y no hace referencia a las características texturales, las cuales definen el comportamiento hidrológico del suelo. Por lo anterior, para las propiedades físicas del suelo se utilizó la base de datos armonizada de Los Suelos del Mundo, presente en el programa *Harmonized World Soil Database (version 1.2)* (FAO y ISRIC, 2012). En el programa se encuentra la distribución espacial de más de 15 mil unidades cartográficas de suelo con sus propiedades tales como carbono orgánico del suelo, pH, capacidad de almacenamiento de agua, profundidad del suelo, capacidad de intercambio catiónico del suelo y la fracción de arcilla,

bases intercambiables totales, contenido de limo y yeso, porcentaje de sodio intercambiable, salinidad, clases texturales y granulometría.

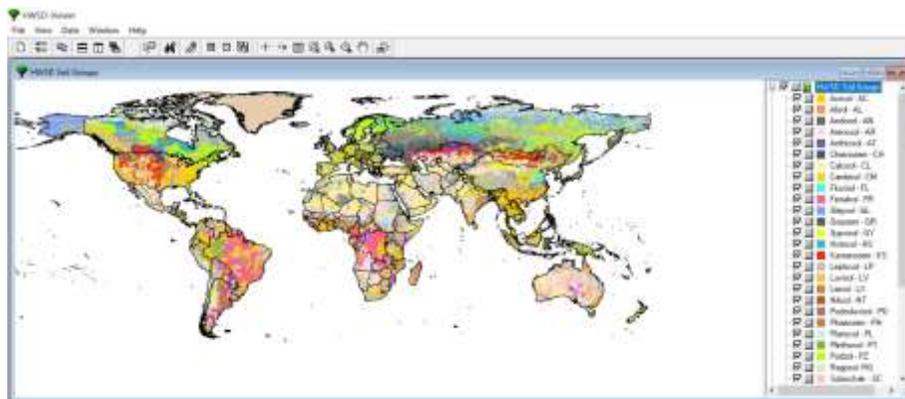


Figura 9-6 Programa Harmonized World Soil Data base (FAO y ISRIC, 2012)

	Dominant Soil		Associated Soils and Inclusions	
Soil Unit Name (FAO74)	-	-	-	-
Soil Unit Symbol (FAO 80)	-	-	-	-
Soil Unit Name (FAO 81)	-	-	-	-
Soil Unit Symbol (FAO 90)	R0e	PHh	R0e	AFu
Soil Unit Name (FAO 90)	Eutric Regosols	Haplic Phaeozems	Eutric Regosols	Urbic Andosols
Topsoil Texture	Coarse	Fine	Coarse	Medium
Reference Soil Depth (cm)	100	100	100	100
PHASE1	-	-	-	-
PHASE2	-	-	-	-
Obstacles to Roots (ESD0) (cm)	-	-	-	-
Impermeable Layer (ESD6) (cm)	-	-	-	-
Soil Water Regime (ESD8)	-	-	-	-
Drainage class (0-0.5% slope)	Somewhat Excessive	Moderately Well	Somewhat Excessive	Moderately Well
AWC (mm)	100	150	100	150
Sodic Properties	No	No	No	No
Acid Properties	No	No	No	No
Peric Properties	No	No	No	No
TOPSOIL (0-30 cm)				
Topsoil Sand Fraction (%)	73	25	73	50
Topsoil Sil Fraction (%)	23	35	23	42
Topsoil Clay Fraction (%)	4	40	4	8
Topsoil USDA Texture Classification	sandy loam	clay (light)	sandy loam	loam
Topsoil Reference Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.7	1.27	1.7	1.56
Topsoil Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.52	1.18	1.52	1.41
Topsoil Gravel Content (%)	19	4	19	20
Topsoil Organic Carbon (% weight)	0.41	2.74	0.41	4.19
Topsoil pH (pH25)	6	6.4	6	6.4
Topsoil CEC (clay) (cmol/kg)	140	21	140	140
Topsoil CEC (total) (cmol/kg)	14	18	14	38
Topsoil Base Saturation (%)	80	90	80	80
Topsoil TEB (cmol/kg)	11.2	16.2	11.2	30.4
Topsoil Calcium Carbonate (% weight)	0	0.2	0	0
Topsoil Gypsum (% weight)	0	0.1	0	0
Topsoil Sodium (ESP) (%)	2	1	2	1
Topsoil Salinity (ECe) (dS/m)	0	0.1	0	0

Figura 9-7 Base de datos armonizada de Los Suelos del Mundo (FAO y ISRIC, 2012)

Posteriormente, se utilizó la información textural y de profundidad de los perfiles de suelo realizados por Peña (2013) en el Complejo Volcánico Chichinautzin y perfiles de suelo

realizados por el Colegio de México bajo el proyecto 290832<sup>1</sup> en la Sierra de las Cruces para tener una caracterización textural más precisa. Para las propiedades hidráulicas del suelo se utilizó los valores texturales, carbón orgánico y contenido de gravas adquiridos de los perfiles del suelo de conservación de la Ciudad de México, la base de datos de Suelos del Mundo y se utilizó el programa *soil water characteristic* (Saxton y Rawls, 2009). El programa permite a partir de las propiedades antes mencionadas, calcular la densidad aparente, el agua disponible, y la conductividad hidráulica; valores hidráulicos del suelo requeridos por el programa SWAT (Uribe, 2010). Si bien ambos grupos de perfiles de suelo presentaban el valor de densidad aparente, agua disponible y conductividad hidráulica se decidió utilizar el programa con el objetivo de validar la generación de información a partir de fuentes secundarias. Las Unidades de Suelo fueron divididas en rangos de profundidad de suelo de acuerdo a la predicción explicada a continuación.

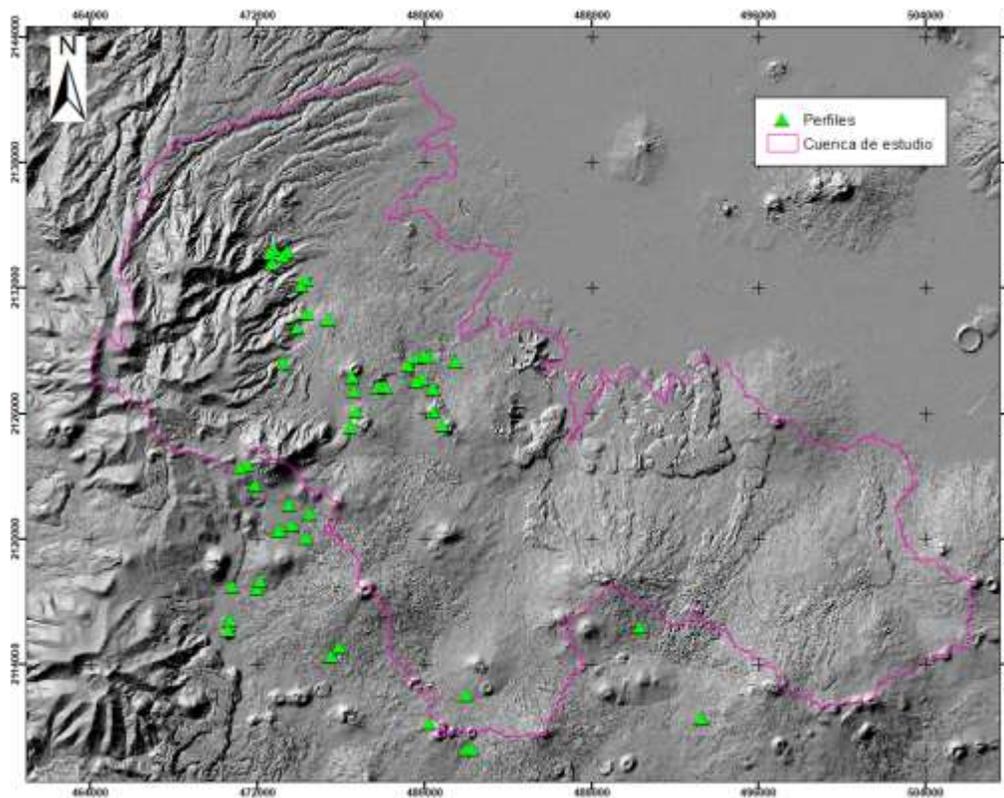


Figura 9-8 Localización perfiles de suelo (INEGI, 2019c; Peña Ramirez, 2013)

<sup>1</sup> Proyecto 290832 de ANR-CONACYT 2016-17 “Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change (TRASSE)”.

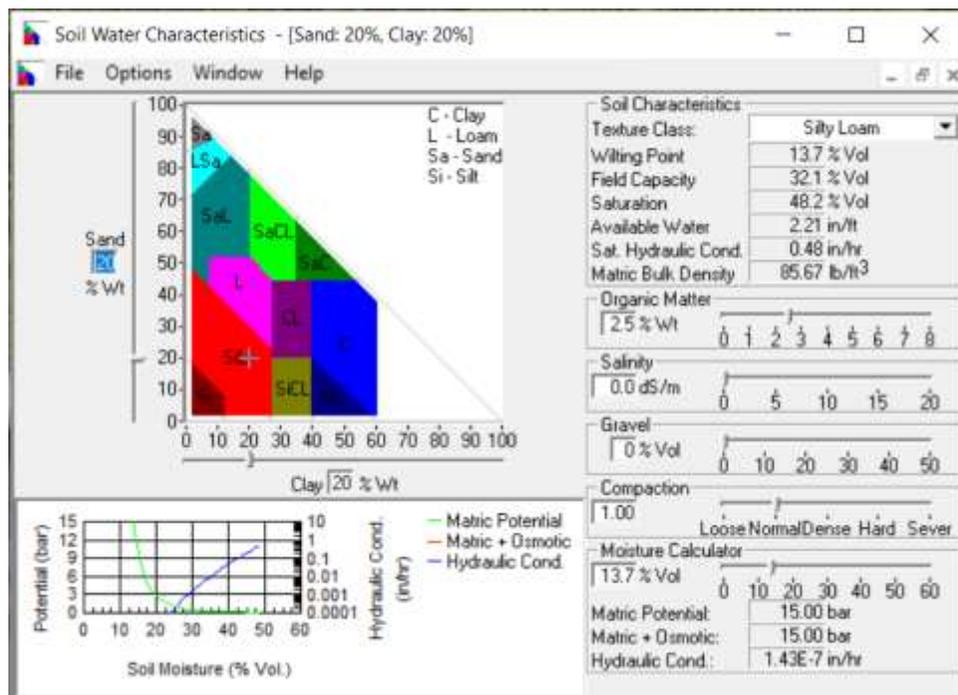


Figura 9-9 Programa Soil Water Characteristics (Saxton y Rawls, 2009)

#### 9.2.2.1. Profundidad de los suelos

Para definir la profundidad de los suelos se utilizó Machine Learning por medio de la biblioteca Scikit-learn, específicamente el algoritmo de Bosques Aleatorios de Clasificación (Pedregosa et al., 2011). En términos generales, el algoritmo busca de manera automática a partir de una base de datos, la cual presenta la variable a predecir y otras más de unos puntos conocidos, generar una ecuación local que permita predecir la variable deseada (Pedregosa et al., 2011). A partir de la información de los perfiles en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, se realizó una base de datos donde se relaciona la profundidad del perfil, la pendiente, y la altura. Es de aclarar que, si bien estas variables no son las únicas que intervienen en la profundidad del suelo, se buscó generar la base de datos con variables de fácil adquisición y confiabilidad. Es decir, con la base de datos se calculó una ecuación que al introducir pendiente y altura daba como resultado la predicción de la profundidad de suelo. No obstante, para futuras investigaciones que se centren en la caracterización del suelo, se debería alimentar la base de datos con nuevas variables que influyan en la profundidad del suelo ya que a mayor cantidad de variables el algoritmo mejora su nivel de predicción.

### 9.2.3. Procesamiento de la información recopilada

En este paso se utilizó la información recopilada y generada en las etapas previas, y se procesó con ayuda de sistemas de información geográfica para unificar el formato y cumplir con los requerimientos de entrada para el manejo del programa SWAT. Del mismo modo, se procesó la información geológica, estructural e hidrológica para la generación del modelo hidrológico conceptual

#### 9.2.3.1. Litología y geología estructural

Para definir la geología en superficie, se utilizaron las cartas geológicas descargadas de la página del INEGI (INEGI, 2019b) y el mapa de sombras generado a partir del Modelo de elevación digital. Se realizó un análisis geomorfológico y siguiendo la información geológica de las cartas, se digitalizó en formato shape las litologías presentes en la zona de estudio (Arce et al. 2019; INEGI, 2019c).

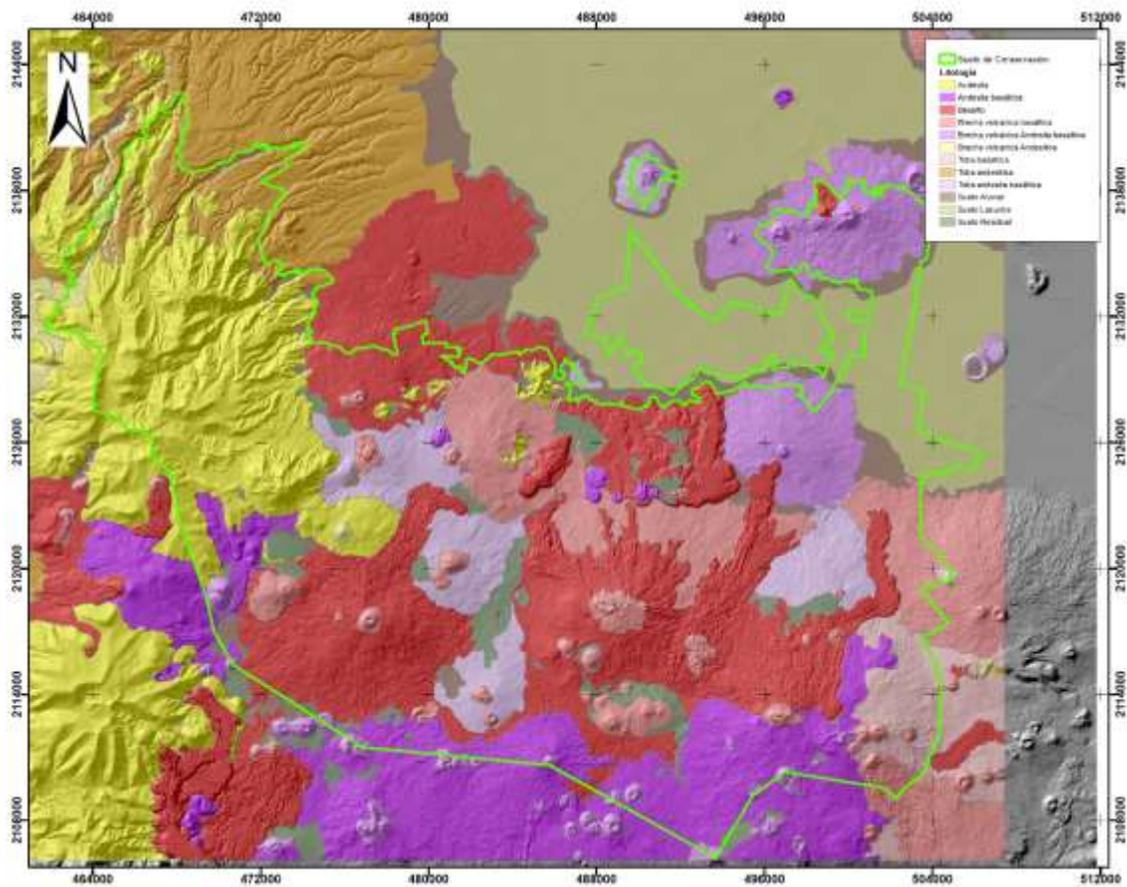


Figura 9-10 Geología Suelos de Conservación de la Ciudad de México (INEGI, 2019c, 2019b).

Sin embargo, la clasificación presente en las planchas combina clases texturales con clases litológicas, por lo que se reclasificó la información geológica basados en Arce et al., (2019).

Se realizó un análisis morfoestructural a partir del mapa de sombras, y con la información en Arce et al., (2019) y García-Palomo et al., (2008), se digitalizaron las fallas y lineamientos existentes en la cuenca de estudio. Del mismo modo, se creó las zonas de falla para lineamientos y fallas en la Sierra de las Cruces con el propósito de representar el cambio del comportamiento hidráulico a medida que el agua pasa entre roca madre, la zona de daño y el núcleo de la falla en el modelo como lo describe Caine et al., (1996).

#### 9.2.3.2. Topografía

Utilizando el software ARCGIS, se unieron 88 modelos de elevación digital de resolución espacial de 5 metros obtenidas de la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019c). Los modelos de elevación digital utilizados presentan la ventaja de encontrarse ya proyectados en coordenadas planas por lo que no presentan vacíos de información entre límites a la hora de unirse. Sin embargo, posterior a la Unión, se utilizó la herramienta “FILL” para corregir errores existentes en el modelo de elevación digital final. Debido a la exigencia computacional que se requiere al trabajar con un modelo de elevación digital de 5m, el DEM final fue remuestreado a una resolución espacial de 30m. El remuestreo generaliza la información del DEM pero reduce el tiempo de procesamiento y costos computacionales al modelar ( Arnold et al., 2012).

#### 9.2.3.3. Delimitación de sub cuencas.

Aunque la delimitación de las subcuencas puede ser realizada por SWAT a partir del Modelo de elevación digital y la extensión ARCSWAT (Winchell et al., 2007), se decidió utilizar la extensión ARCHYDRO (Maidment y Morehouse, 2002) el cual permite definir el área mínima deseada para las microcuencas. Posteriormente, con el mapa de sombras el cual permite observar los rasgos geomorfológicos de la zona, se agruparon las microcuencas en subcuencas representativas para el suelo de conservación que aportan agua a la Ciudad de México. Las subcuencas que pertenecen a otra cuenca diferente a la Cuenca de México, las cuales se encuentran en el Suelo de Conservación, fueron descartadas para la elaboración del Modelo.

#### 9.2.3.4. Uso del Suelo

Para el Uso del Suelo se utilizó una imagen Landsat del año 2017 con resolución espacial de 30 metros, en el cual cada valor pixel representa alguno de los 17 tipos de coberturas posibles en el área de estudio de acuerdo a CONABIO, (2017).

<b>Cobertura</b>	<b>Nombre</b>
1	Bosques de aciculifolias y escuamifolias
2	Bosques Latifoliados
3	Bosque húmedo de montaña
4	Manglar y petén
5	Selvas Húmedas
6	Selvas secas
7	Matorral alto denso
8	Matorral méxico
9	Matorral bajo abierto
10	Vegetación acuática menor
11	Vegetación de suelos arenosos
12	Vegetación halófila
13	Pastizales y otra vegetación herbácea
14	Tierras Agrícolas
15	Urbano y construido
16	Suelo Desnudo
17	Agua

*Tabla 9-2. Clasificación de Coberturas.(CONABIO, 2017)*

Las clases de coberturas fueron homologadas a la clasificación presente en la base de datos de SWAT.

### **9.3. Fase 3. Modelación**

En la fase de modelación se realizó un modelo hidrológico conceptual para identificar las diferencias geológicas, estructurales e hidrológicas entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin. Seguidamente, se elaboró el modelo de lluvia – escorrentía por medio del programa SWAT con la información procesada en la fase anterior. Posteriormente se calibró el modelo y finalmente se corrió bajo dos escenarios hipotéticos propuestos para observar el cambio en la recarga de agua subterránea.

### **9.3.1. Modelo Conceptual hidrológico**

El propósito del modelo hidrológico conceptual es identificar las características geológicas, estructurales e hidrológicas del Suelo de Conservación de la Ciudad de México, que permitan entender cómo funciona el proceso de recarga de agua subterránea. Se desarrolló como complemento al modelo SWAT para tratar de responder las diferencias de los procesos hídricos superficiales entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcanico de Chichinautzin.

Para su elaboración se utilizó las cartas geológicas de INEGI (2019b), la geología propuesta por Arce et al. (2019), la información derivada del modelo de elevación digital, para la información estructural se utilizó a Arce et al.(2019) y García-Palomo et al.(2008) y la información de densidad de manantiales (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018). Para la información del funcionamiento hidrológico se utilizó a Durazo y Farvolden, (1989), Flórez Peñaloza(2019), Escolero Fuentes (2018). Finalmente, se propuso el funcionamiento de recarga en el Suelo de Conservación teniendo en cuenta la información anterior y los conceptos teóricos propuestos por Custodio (2007), Bense et al.(2013), Caine (1996), Meinzer (1927) y Kresic y Stevanovic (2009).

### **9.3.2. Modelo hidrológico (SWAT)**

Una vez listos todos los insumos, se procedió a modificar la base de datos de suelos que viene por defecto en el programa, ya que es una clasificación para los Estados Unidos. Del mismo modo se ingresó la delimitación de las subcuencas, los canales principales, datos climáticos y se corrió el programa satisfactoriamente entre el periodo 01/01/2015 y 04/03/2020 con 4 años de calentamiento como es sugerido por el manual (Arnold et al., 2013). Los años de calentamiento son años que el modelo corre con el propósito de generar una línea base de niveles freáticos y humedad de suelo con el cual arrancar en el tiempo de modelado de interés (Arnold et al., 2013).

### **9.3.3. Calibración**

De acuerdo a Anderson et al. (2015) el proceso de calibración consiste en demostrar que el modelo realizado es capaz de representar los valores medidos en campo; en este caso los caudales medidos. Para este proyecto se utilizó la técnica de prueba y error (trial and error) el cual consiste en ir variando las propiedades del modelo de una forma manual teniendo en cuenta el conocimiento de la zona de estudio. Para la calibración del modelo se optó por no

modificar las propiedades del suelo conductividad hidráulica, profundidad del suelo y agua disponible con el fin de evaluar la validez de la generación de esa información a partir de información secundaria.

Los valores modelados se contrastaron con los valores medidos en campo y se calculó el porcentaje de error. Además, se calculó el R cuadrado para determinar la bondad del ajuste.

#### 9.3.3.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad busca cuantificar la incertidumbre en el modelo causado por la incertidumbre en los parámetros estimados (Anderson et al., 2015). Se escogieron las variables que en el proceso de calibración mostraron mayor incidencia en los cambios de caudal. Después, se aumentó y disminuyó en determinados porcentajes estas variables con el propósito de identificar qué variables son las más sensibles y el rango de sensibilidad (Anderson et al., 2015).

Las variables escogidas fueron conductividad hidráulica, tiempo de retraso de recarga y flujo lateral. El valor de conductividad hidráulica fue calculado para cada tipo de suelo con el programa *soil water characteristic* (Saxton y Rawls, 2009). El tiempo de retraso y flujo lateral se estimaron en el proceso de calibración con el método ensayo y error.

#### 9.3.4. Escenario hipotético.

Una vez calibrado el modelo, se creó un escenario hipotético de cambio de uso de suelo, para observar la respuesta en la recarga de agua subterránea en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

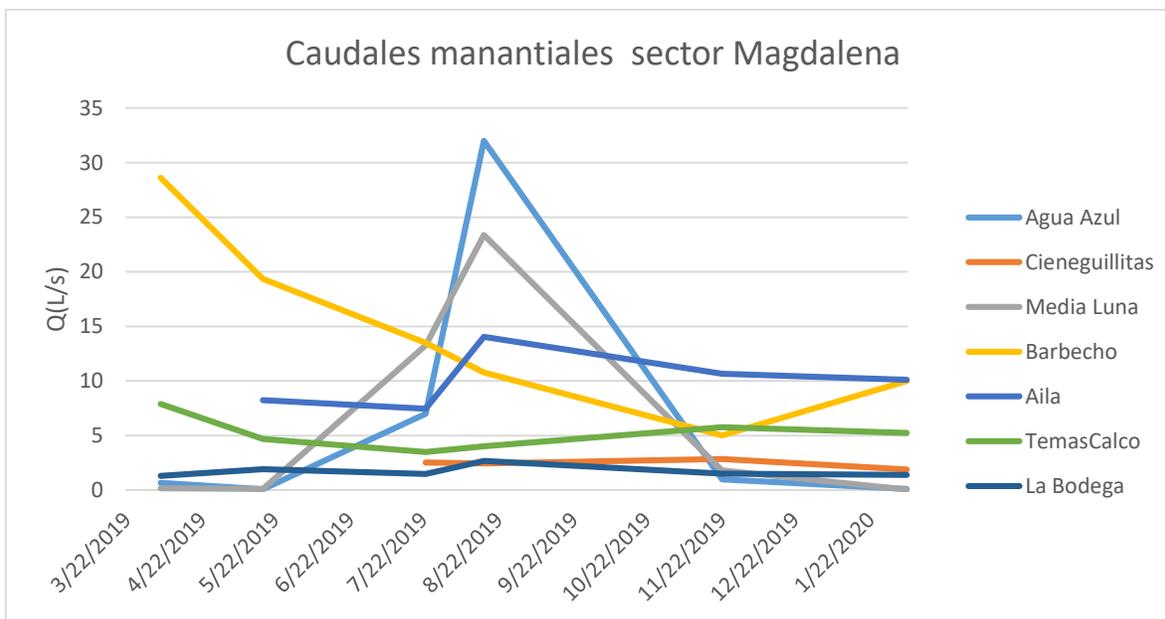
En el escenario hipotético, el uso urbano y el uso agricultura amplían su extensión, disminuyendo la cobertura de vegetación natural tanto en la Sierra de las Cruces, como en el Complejo Volcánico de Chichinautzin. Se propuso este escenario basados en Suárez y Delgado (2007), los cuales identificaron la tendencia de expansión del suelo urbano, también observada por San Miguel Villegas (2010). Sin embargo, aunque para ellos la agricultura disminuiría por la expansión urbana, para este escenario se estableció que tanto agricultura como suelo urbano se expandiera contemplando la necesidad de abastecimiento de la Ciudad.



18 En la Tabla 10-1 se encuentran los valores de caudal calculado en el sector de Magdalena y  
 19 en la Figura 10-2 el comportamiento del caudal en los manantiales durante el monitoreo.

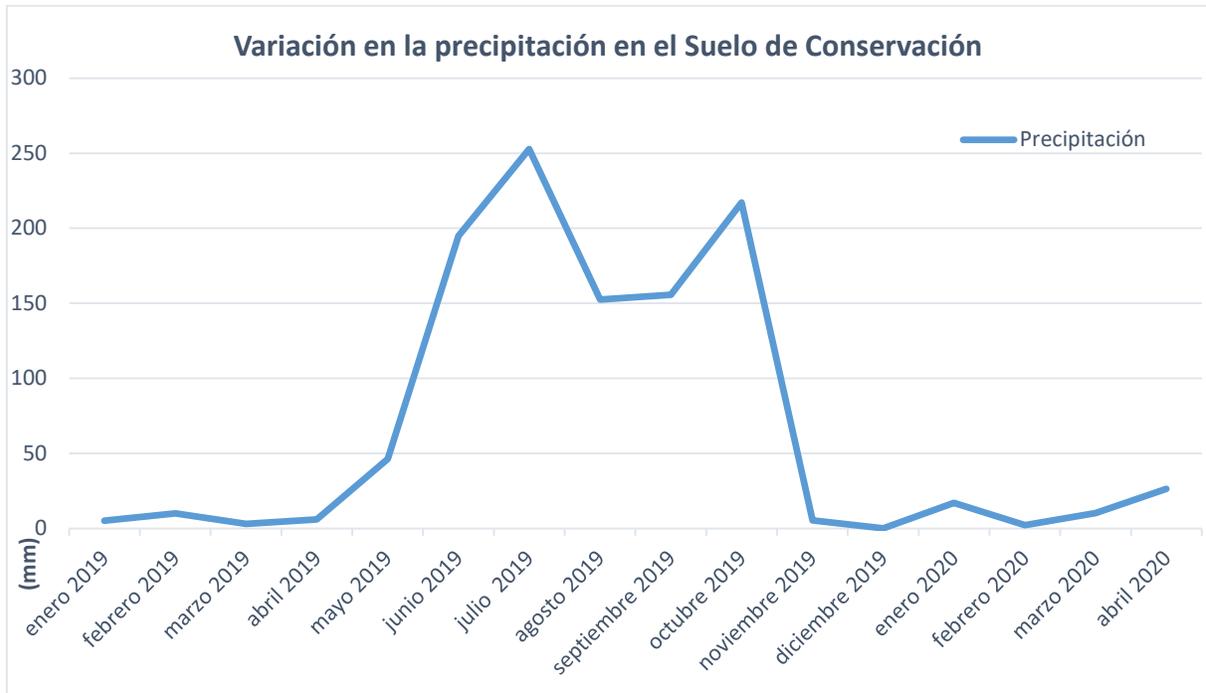
Magdalena	Q(L/s)						
Fecha	Agua Azul	Cieneguillitas	Media Luna	Barbecho	Aila	TemasCalco	La Bodega
3/22/2019					9.72		
4/5/2019	0.67		0.18	28.60		7.90	1.30
5/17/2019	0.08		0.11	19.36	8.23	4.69	1.92
7/23/2019	6.99	2.54	13.26	13.50	7.46	3.50	1.47
8/16/2019	32.00	2.43	23.36	10.79	14.04	4.02	2.67
11/22/2019	0.98	2.85	1.80	5.02	10.65	5.78	1.51
2/6/2020	0.12	1.90	0.06	9.98	10.12	5.23	1.40

20 *Tabla 10-1 Caudales manantiales sector Magdalena*



21  
 22 *Figura 10-2 Caudales monitoreados sector Magdalena*

23



24

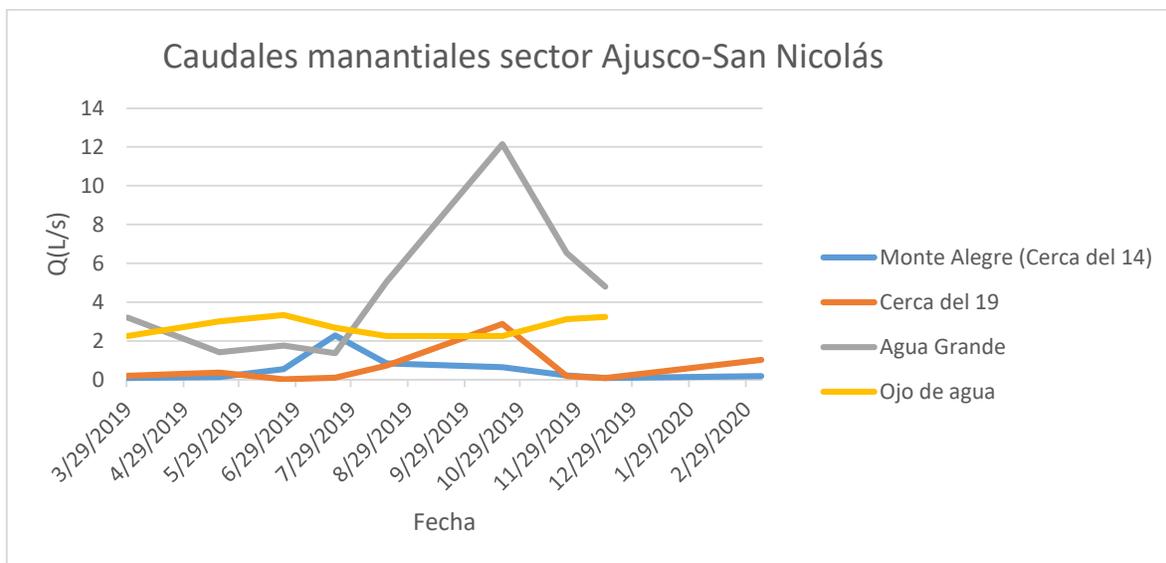
25 *Figura 10-3. Variación de la precipitación Suelo de Conservación*

26

Ajusco y San Nicolás	Q(L/s)			
	Monte Alegre (Cerca del 14)	Cerca del 19	Agua Grande	Ojo de agua
3/29/2019	0.08	0.20	3.20	2.25
5/18/2019	0.13	0.36	1.41	3.00
6/22/2019	0.55	0.02	1.76	3.33
7/20/2019	2.29	0.10	1.37	2.68
8/17/2019	0.84	0.72	5.04	2.25
10/19/2019	0.64	2.88	12.15	2.25
11/23/2019	0.21	0.18	6.53	3.12
12/14/2019	0.08	0.09	4.79	3.23
3/8/2020	0.18	1.01		

27

*Tabla 10-2. Caudales de manantiales sector Ajusco-San Nicolás*



28

29 *Figura 10-4 Caudales manantiales sector Ajusco-San Nicolás*

30 No se evidencia un patrón de comportamiento entre los manantiales monitoreados. Sin  
 31 embargo, en la mayoría de los manantiales ocurre un aumento de caudal que coincide con el  
 32 inicio del periodo de lluvia ( Figura 10-3), un nuevo pico en el mes de octubre y un descenso  
 33 evidente en los siguientes meses como es el caso de los manantiales “Cerca del 19” y “Cerca  
 34 del 14” (Figura 10-4 y Tabla 10-2. Caudales de manantiales sector Ajusco-San Nicolás. Lo  
 35 anterior no aplica con el manantial de Barbecho el cual presenta un descenso de caudal  
 36 durante todo el año. Ojo de Agua y Temascalco presentan una disminución del caudal en  
 37 periodo de lluvia y un aumento en periodo de estiaje. El manantial Aila presenta un aumento  
 38 de caudal en el periodo de agosto y para el periodo de noviembre ocurre una disminución.  
 39 El manantial La Bodega presenta un caudal relativamente constante durante el año de  
 40 monitoreo.

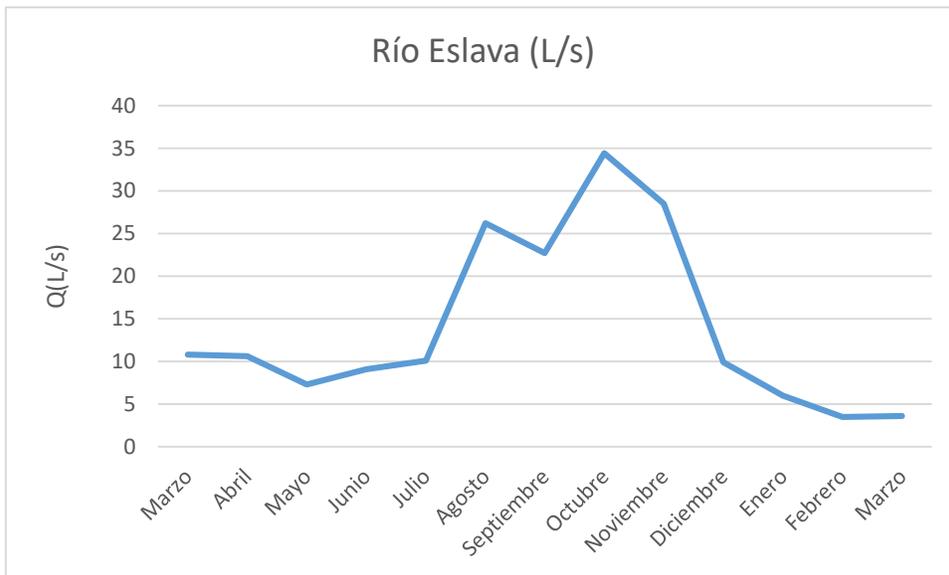
Año	Fecha	Eslava (L/s)	Viborillas (L/s)	Magdalena (L/s)
2019	Marzo	10.8	2.3	
2019	Abril	10.6	2.1	
2019	Mayo	7.3	1.8	
2019	Junio	9.1	1.9	
2019	Julio	10.1	2.3	
2019	Agosto	26.2	3.0	
2019	Septiembre	22.7	2.9	763.2
2019	Octubre	34.4	2.9	950.3
2019	Noviembre	28.5	2.5	570.7

2019	Diciembre	9.9	2.1	242.7
2020	Enero	6.0	2.2	169.2
2020	Febrero	3.5	2.1	126.9
2020	Marzo	3.6	2.3	129.2

41

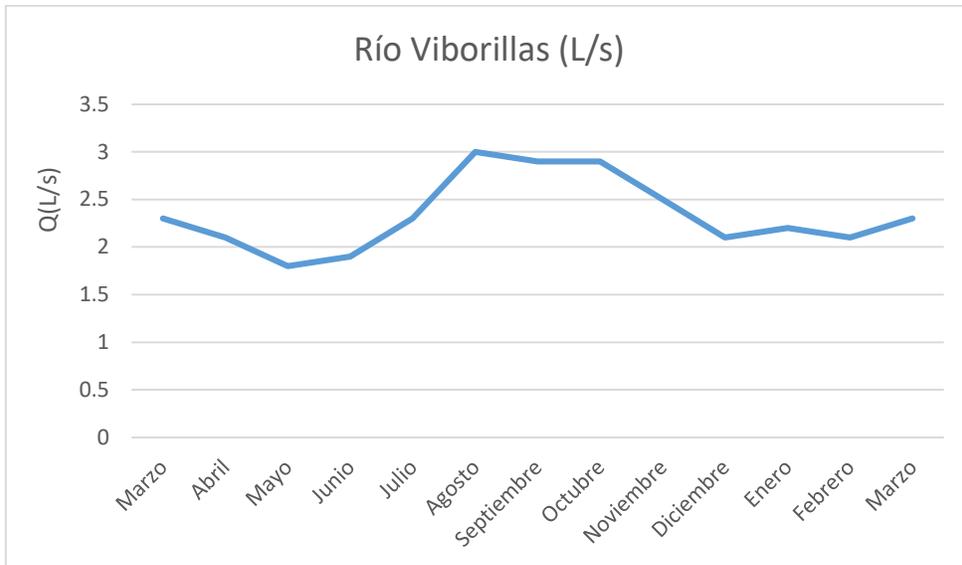
*Tabla 10-3. Caudales de ríos monitoreados con el sensor*

42 La Tabla 10-3 muestra los caudales calculados a partir de los sensores instalados en los ríos.  
 43 Se observa un descenso del caudal para los primeros meses de monitoreo (marzo, abril y  
 44 mayo) y un repunte desde el mes de junio el cual encuentra un máximo en el mes de agosto,  
 45 sufriendo un descenso para septiembre, ascendiendo nuevamente en el mes de octubre y a  
 46 partir del mes de noviembre una continua disminución. A diferencia de los Ríos Magdalena  
 47 y Eslava, el Río Viborillas no varía su caudal de una forma drástica (Figura 10-5, Figura  
 48 10-6, Figura 10-7).



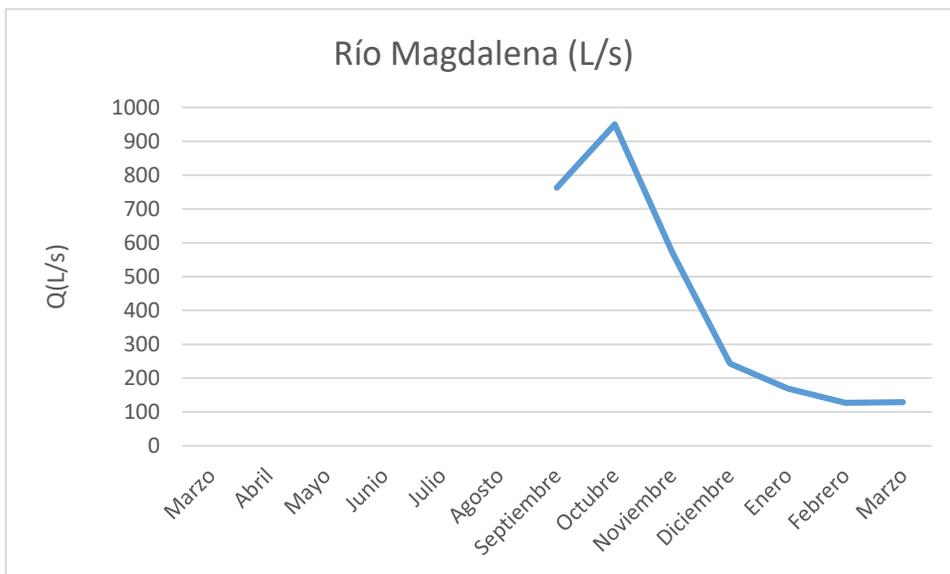
49

50 *Figura 10-5. Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Eslava.*



51

52 *Figura 10-6 Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Viborillas*



53

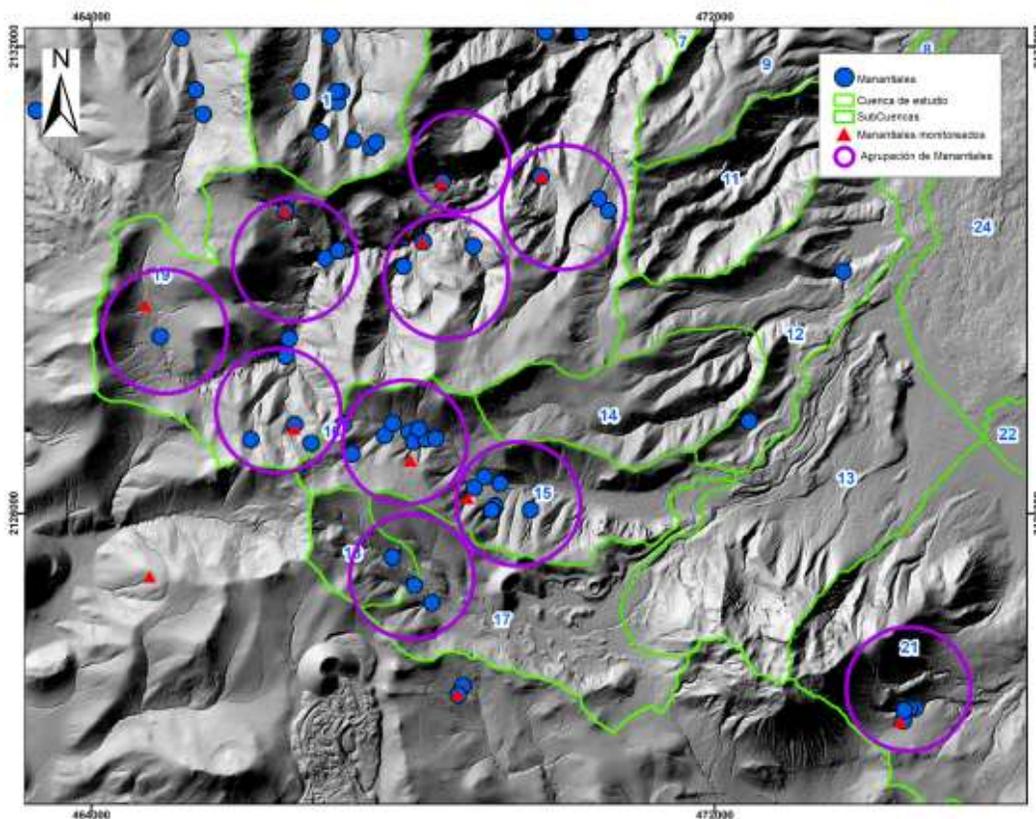
54 *Figura 10-7 Caudales calculados a partir de datos del sensor Río Eslava.*

### 55 **10.1.2. Caudal aportado por manantiales**

56 En la Figura 10-8 se observan las asociaciones definidas entre los manantiales monitoreados  
 57 y los no monitoreados (círculos morados). Como se expresó en la metodología, los criterios  
 58 de agrupación fueron cercanía y alturas similares. Posteriormente, se asignó el valor de  
 59 caudal monitoreado en campo a los no monitoreados.

60 La mayoría de los manantiales monitoreados se encuentran en la Subcuenca 19. En esta  
 61 Subcuenca se encuentra el Río Magdalena y se puede apreciar que la distribución de

62 manantiales ocurre desde la parte alta de la Subcuenca hasta la desembocadura. La  
63 Subcuenca 15 presenta alta densidad de manantiales y dos de ellos fueron monitoreados  
64 durante el año de estudio. La Subcuenca 14 la cual corresponde al Río Eslava no presenta  
65 afloramientos de manantiales. El Río Viborillas se encuentra en la Subcuenca 18 y aunque  
66 presenta algunos manantiales estos no fueron monitoreados. El manantial Agua Grande fue  
67 monitoreado durante todo el año, sin embargo, no se tiene en cuenta para el análisis debido  
68 a que se encuentra por fuera del área de estudio.



69

70 *Figura 10-8 Agrupación de manantiales* (GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI,  
71 2019c).

72 Se calculó el aporte de manantiales para las subcuencas 19 y 15 por ser la subcuencas con  
73 manantiales monitoreados. La estimación de aporte se realizó de forma manual debido a que  
74 SWAT no calcula salidas de agua subterránea diferentes al flujo base (Arnold et al., 2013).

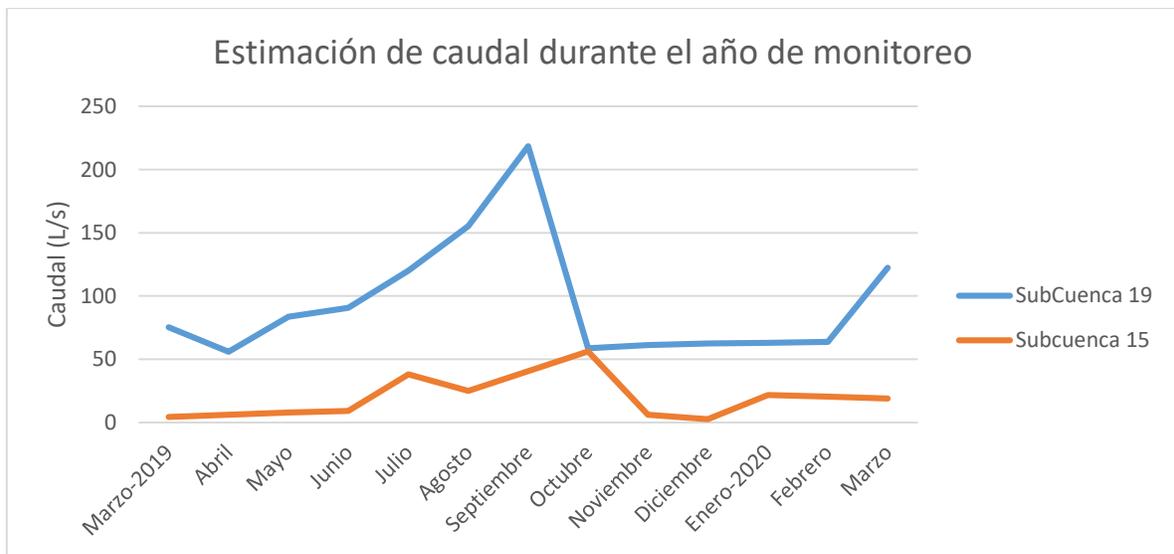
75 El aporte de los manantiales en la Subcuenca 19 es mucho mayor que en la Subcuenca 15,  
76 evidentemente por la diferencia de espacio que ocupa cada subcuenca. Se observa un aporte  
77 constante por parte de los manantiales durante el periodo de estudio, con un aumento que

78 coincide con el inicio del periodo de lluvia. Durante el periodo de lluvia el comportamiento  
 79 de los manantiales por cuenca es diferente. En la Subcuenca 19 ocurre un ascenso en los  
 80 valores de caudal hasta el mes de septiembre y posteriormente disminuye su caudal hasta un  
 81 nuevo ascenso en el último mes monitoreado (Figura 10-9 y Tabla 10-4). Para el caso de la  
 82 Subcuenca 15 después del ascenso de caudal originado por las lluvias, ocurre un descenso  
 83 para el mes de agosto y un repunte en septiembre y octubre para finalmente descender en los  
 84 meses finales de 2019. Para los primeros meses del año 2020 ocurre un aumento de caudal.

Subcuenca	19	15
Fecha	Caudal L/s	
Marzo-2019	75.3	4.5
Abril	55.9	6.1
Mayo	83.5	7.8
Junio	90.7	9.1
Julio	120.2	38.1
Agosto	155.3	25.0
Septiembre	218.4	40.5
Octubre	58.8	56.3
Noviembre	61.3	6.2
Diciembre	62.5	2.7
Enero-2020	63.1	21.7
Febrero	63.7	20.4
Marzo	122.4	19.0

85

Tabla 10-4. Estimación de aporte de los manantiales a las subcuencas



86

87

Figura 10-9 Estimación de caudal para de manantiales para las Subcuencas 19 y 15

88 **10.2. Resultados fase 2**

89 **10.2.1. Topografía**

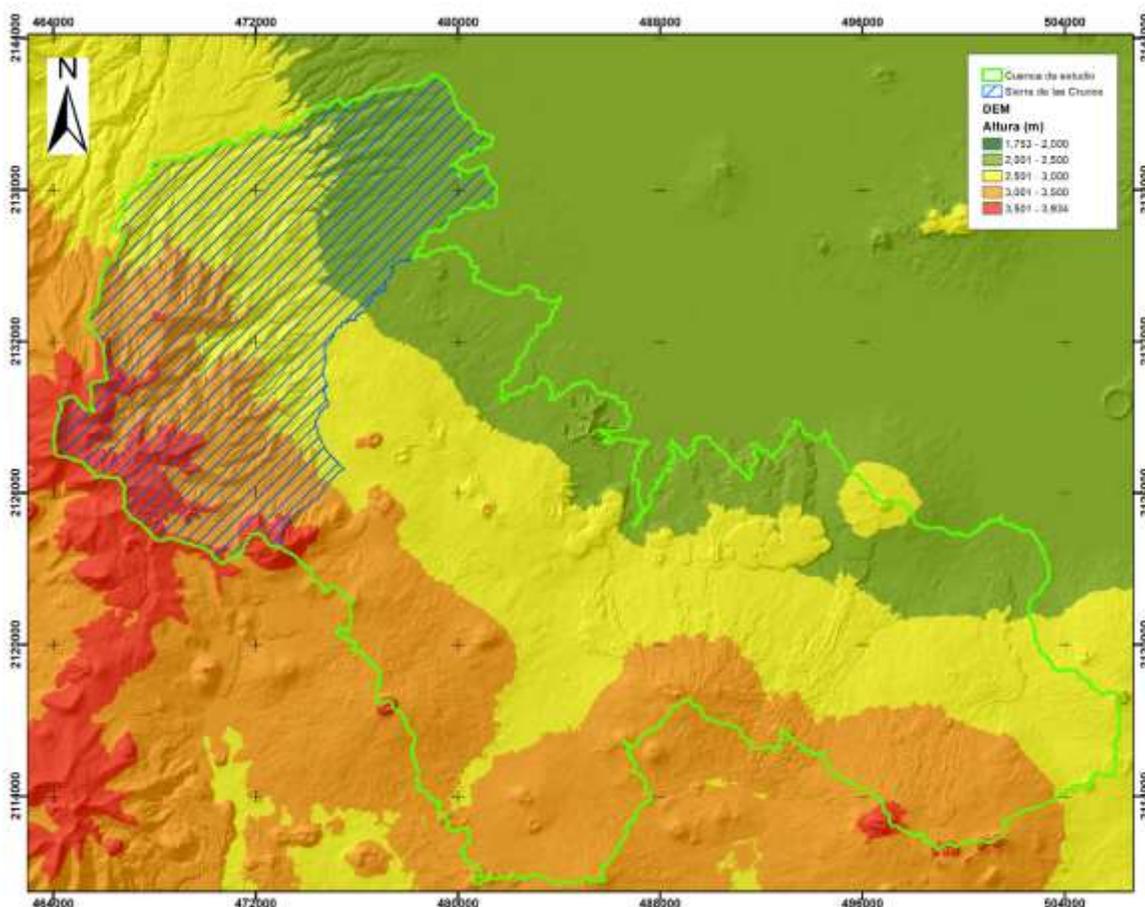


Figura 10-10 Modelo de Elevación Digital (INEGI, 2019c).

Altura (m)	Área Suelo de Conservación (Km <sup>2</sup> )	%	SC (Km <sup>2</sup> )	%	CVC (Km <sup>2</sup> )	%
2000-2500	134.2	21.8	41.8	23.5	92.4	21.1
2500-3000	260.0	42.3	60.8	34.2	199.2	45.6
3000-3500	196.8	32.0	54.0	30.4	142.7	32.7
3500-4000	23.7	3.9	21.0	11.8	2.7	0.6
Total	614.7	100.0	177.6	100.0	437.0	100.0

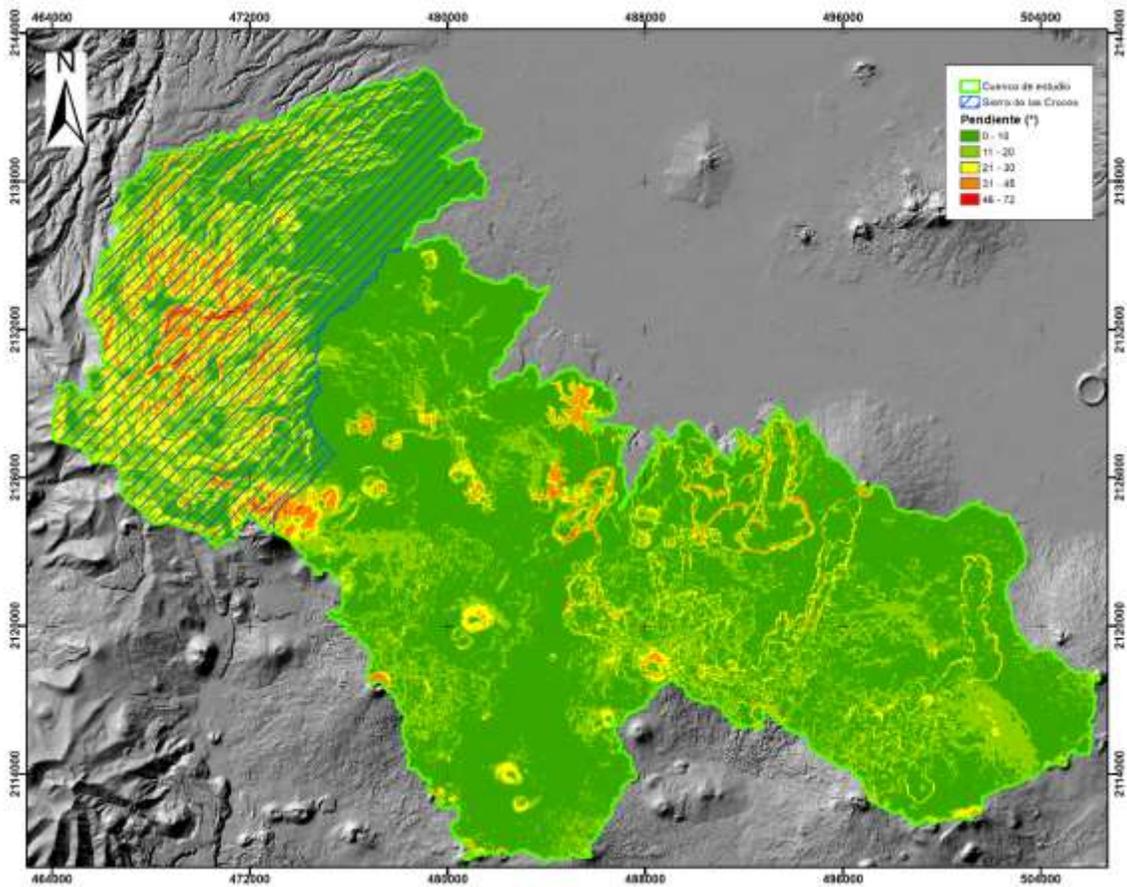
Tabla 10-5. Distribución de alturas Suelo de Conservación.

90  
91  
92

93

94 En el Suelo de Conservación predominan alturas entre 2500 a 3000 metros con un 42.31%  
95 de cobertura, seguido por alturas entre 3000 y 3500 metros con 32.01% y 21.83 % para alturas  
96 entre 2000-2500 metros. Alturas superiores a los 3500 metros corresponden al 3.9% de la

97 superficie del Suelo de Conservación y corresponden en su gran mayoría a la Sierra de las  
 98 Cruces (SC). Para el caso del Complejo Volcánico de Chichinautzin (CVC) más del 90% del  
 99 área se encuentra en profundidades inferiores a los 3500 metros.



100

101

102

Figura 10-11 Pendiente en el Suelo de Conservación (INEGI, 2019c)

Pendiente (°)	Área Suelo de Conservación (Km <sup>2</sup> )	%	SC	%	CVC	%
0 - 10	378.2	61.5	72	40.5	306	70.1
11 - 20	154.8	25.2	52.6	29.6	102	23.4
21 - 30	59.3	9.65	38	21.4	21.3	4.87
31 - 45	21.5	3.5	14.4	8.09	7.14	1.63
46 - 72	0.8	0.13	0.66	0.37	0.14	0.03
Total	614.7	100	177.6	100	437.0	100

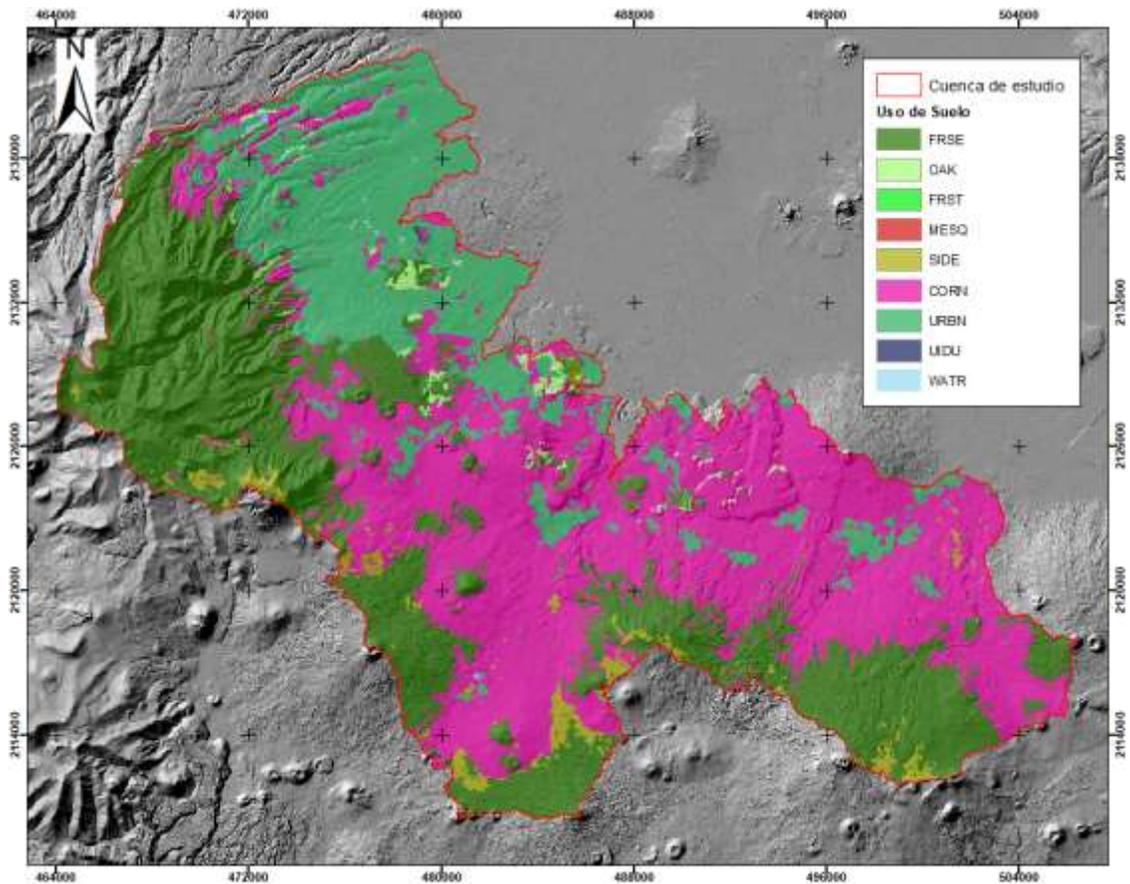
103

Tabla 10-6. Distribución de pendiente

104 Con respecto a la pendiente, en el Complejo Volcánico de Chichinautzin predominan las  
105 zonas con pendientes inferiores a los 10° con un 70.1% de cobertura, seguido por un 23.4%  
106 para pendientes entre 10 y 20 grados. Por otro lado, aunque la Sierra de las Cruces presenta  
107 el 70% de su extensión con pendientes entre los 0° y 20°, presenta mayores inclinaciones que  
108 el complejo Volcanico de Chichinautzin con un 21.4% para pendientes entre los 21 y 30  
109 grados y un 8% para pendientes entre los 31 y 45°.

#### 110 **10.2.2. Uso del Suelo**

111 En el área de estudio se presentan 9 coberturas (Figura 10-12) donde predominan los  
112 Bosques de aciculifolias y escuamifolias o Bosques de coníferas, Tierras agrícolas y la  
113 cobertura Urbano y construido con 37.88%, 30.17% y 27.78% respectivamente (Tabla 10-7).  
114 El uso y cobertura predominante en la Sierra de las Cruces es la clase Bosques de coníferas,  
115 seguido por el uso urbano y agricultura, aunque este último en una mucho menor proporción.  
116 La agricultura es el uso predominante en el Complejo Volcánico de Chichinautzin, con una  
117 menor proporción de Bosques de coníferas, seguido por el uso urbano. Los pastizales y otra  
118 vegetación herbácea tienen mayor presencia en el Complejo Volcánico a diferencia de lo que  
119 se evidencia en la Sierra de las Cruces.



120  
121  
122

Figura 10-12 Uso de Suelo. Modificado de (CONABIO, 2017)

Clase	Porcentaje	SWAT
Bosques de coníferas	37.88%	FRSE
Bosques Latifoliados	0.55%	OAK
Bosque húmedo de montaña	0.01%	FRST
Matorral alto denso	0.04%	MESQ
Pastizales y otra vegetación herbácea	2.78%	SIDE
Tierras Agrícolas	30.17%	CORN
Urbano y Construido	27.78%	URBN
Suelo Desnudo	0.09%	UIDU
Agua	0.70%	WATR

123

Tabla 10-7. Porcentaje Uso del Suelo en el área de estudio

124

### 10.2.3. Edafología

125

#### 10.2.3.1. Profundidad de Suelo

126

Con el algoritmo de Machine learning se obtuvo una predicción de la profundidad del suelo

127

en la zona de estudio (Figura 10-13). Los resultados fueron clasificados en rangos de

128

profundidad de 20 cm desde 0 cm hasta 2 metros. Los suelos con profundidades entre 60 y

129

80 cm predominan en la zona de estudio y se evidencia que a medida que la distancia con el

130

valle disminuye, el suelo reduce su profundidad. El Complejo Volcánico de Chichinautzin

131

presenta suelos más profundos en la parte alta de complejo y a medida que se acerca al valle

132

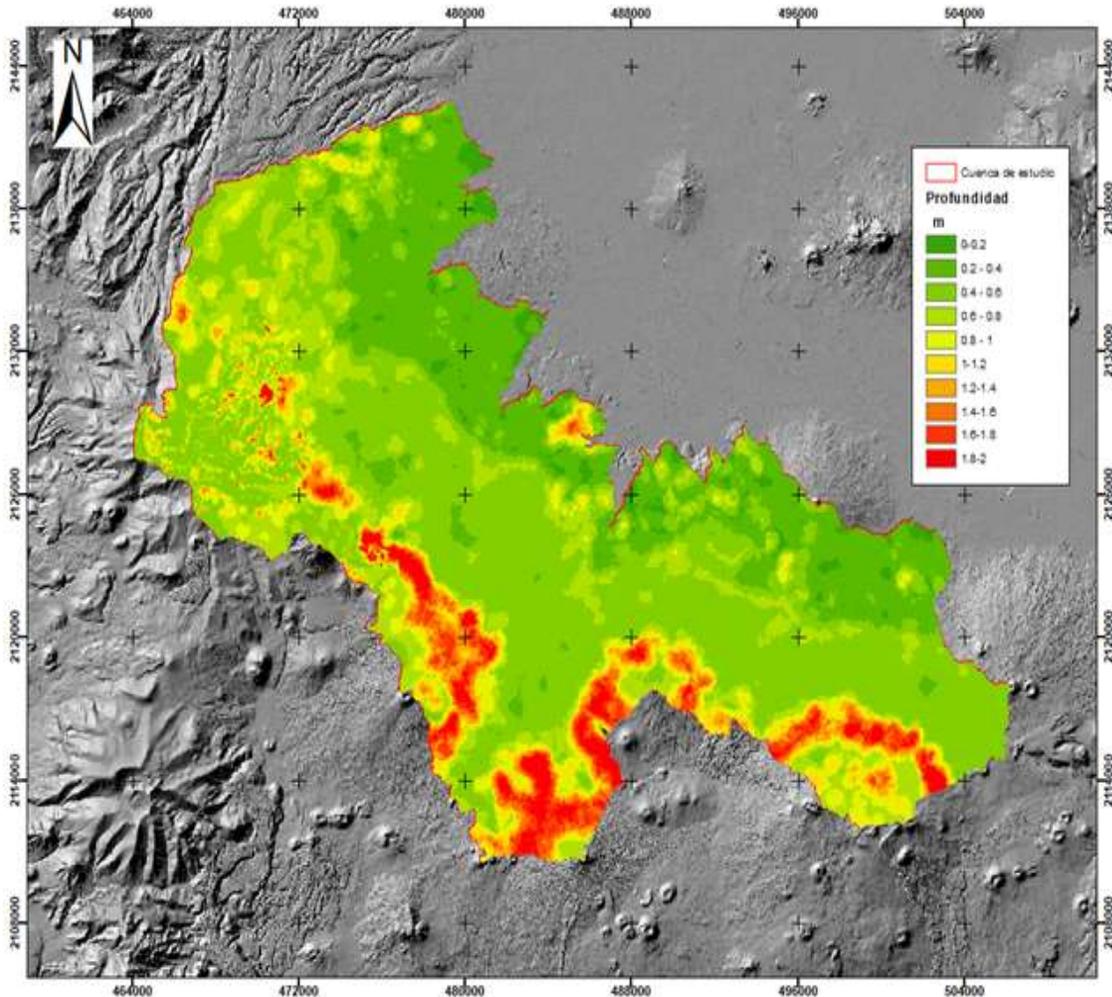
la profundidad del suelo va disminuyendo. La Sierra de las Cruces no presenta una gran

133

proporción de suelo profundo posiblemente por lo abrupto de su topografía y los procesos

134

erosivos que sufre por la interacción con el agua.

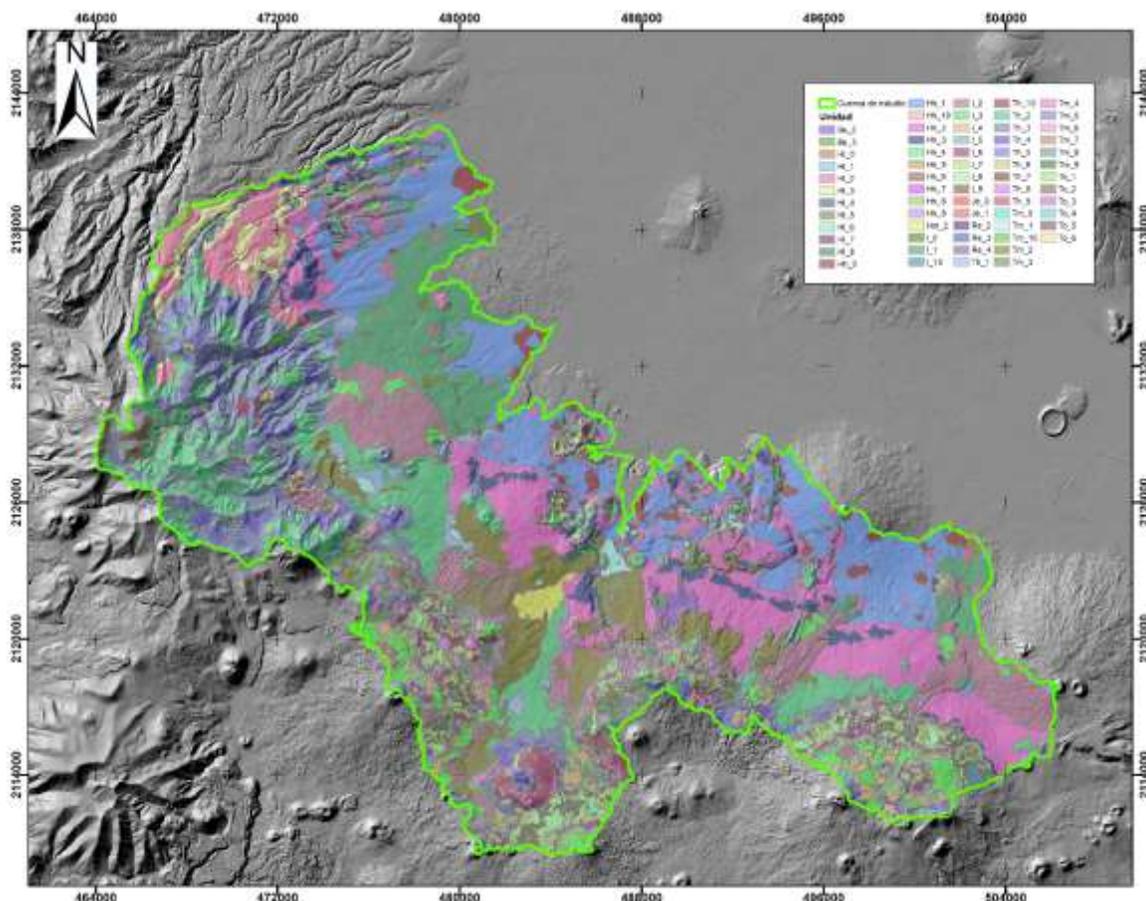


135

136

Figura 10-13 Predicción profundidad de suelo (INEGI, 2019c)

137 Finalmente se obtuvieron 66 polígonos de suelo al cruzar las 10 clases de profundidad con  
 138 los 16 usos del suelo. De las 66 clases 20 representan el 80% del territorio, siendo las clases  
 139 Hh1 y Hh2 las de mayor extensión con 12% cada una.



140  
 141 *Figura 10-14 Tipo de suelo final (INEGI, 2019c, 2019a)*

142

Unidad	%	Unidad	%	Unidad	%	Unidad	%
Hh_1	12.1167	HI_3	1.4830	Be_2	0.3569	To_5	0.0426
Hh_2	12.0167	Tm_3	1.4672	Tm_7	0.3547	HI_6	0.0369
Th_2	10.6761	Th_5	1.3682	Tm_8	0.3469	Re_2	0.0346
I_2	7.8883	To_2	0.8851	Tm_5	0.3289	HI_7	0.0285
Th_3	7.1313	Th_6	0.8127	HI_4	0.3147	Hh_7	0.0234
I_1	6.4507	I_9	0.8019	I_10	0.2966	Je_0	0.0217
Tm_2	5.2458	Th_1	0.7094	Tm_10	0.2602	HI_0	0.0171
I_3	3.9623	Th_7	0.6927	Tm_9	0.2434	HI_8	0.0129
Hh_3	3.4423	Tm_4	0.6356	Hh_5	0.1484	Hh_8	0.0112
Th_4	2.8146	Th_8	0.5478	To_3	0.1384	To_6	0.0059

<b>I_4</b>	2.3217	<b>Hh_4</b>	0.5469	<b>HI_5</b>	0.1071	<b>Tm_0</b>	0.0023
<b>HI_2</b>	2.1336	<b>Th_10</b>	0.4808	<b>Je_1</b>	0.0667	<b>Hh_9</b>	0.0016
<b>I_5</b>	1.6583	<b>Tm_1</b>	0.4733	<b>Re_3</b>	0.0639	<b>Re_4</b>	0.0016
<b>I_7</b>	1.5716	<b>Hm_2</b>	0.4398	<b>To_4</b>	0.0601	<b>To_1</b>	0.0004
<b>I_6</b>	1.5627	<b>I_0</b>	0.4095	<b>HI_1</b>	0.0504	<b>Hh_10</b>	0.0002
<b>I_8</b>	1.5468	<b>Th_9</b>	0.3689	<b>Hh_6</b>	0.0481		
<b>Hh_0</b>	1.5068	<b>Tm_6</b>	0.3590	<b>Be_3</b>	0.0453		

Tabla 10-8. Distribución porcentual de tipo de suelo.

143

144 La nomenclatura observan en la Tabla 10-8 es una combinación entre el tipo de suelo y

145 profundidad. Las claves de tipo de suelo y profundidad se presentan en la Tabla 10-9.

<b>Clave</b>	<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Clave</b>	<b>Profundidad (m)</b>
Be	Cambisol eutrico	0	0-0.2
Hh	Feozem haplico	1	0.2-0.4
HI	Feozem luvico	2	0.4-0.6
Hm	Feozem Molico	3	0.6-0.8
I	Litosol	4	0.8-1
Je	Fluvisol eutrico	5	1-1.2
Re	Regosol eutricol	7	1.2-1.4
Th	Andosol Humico	8	1.4-1.6
Tm	Andosol molico	9	1.6-1.8
To	Andosol ocrico	10	1.8 -2

Tabla 10-9 Claves de tipo de suelo y profundidad

146

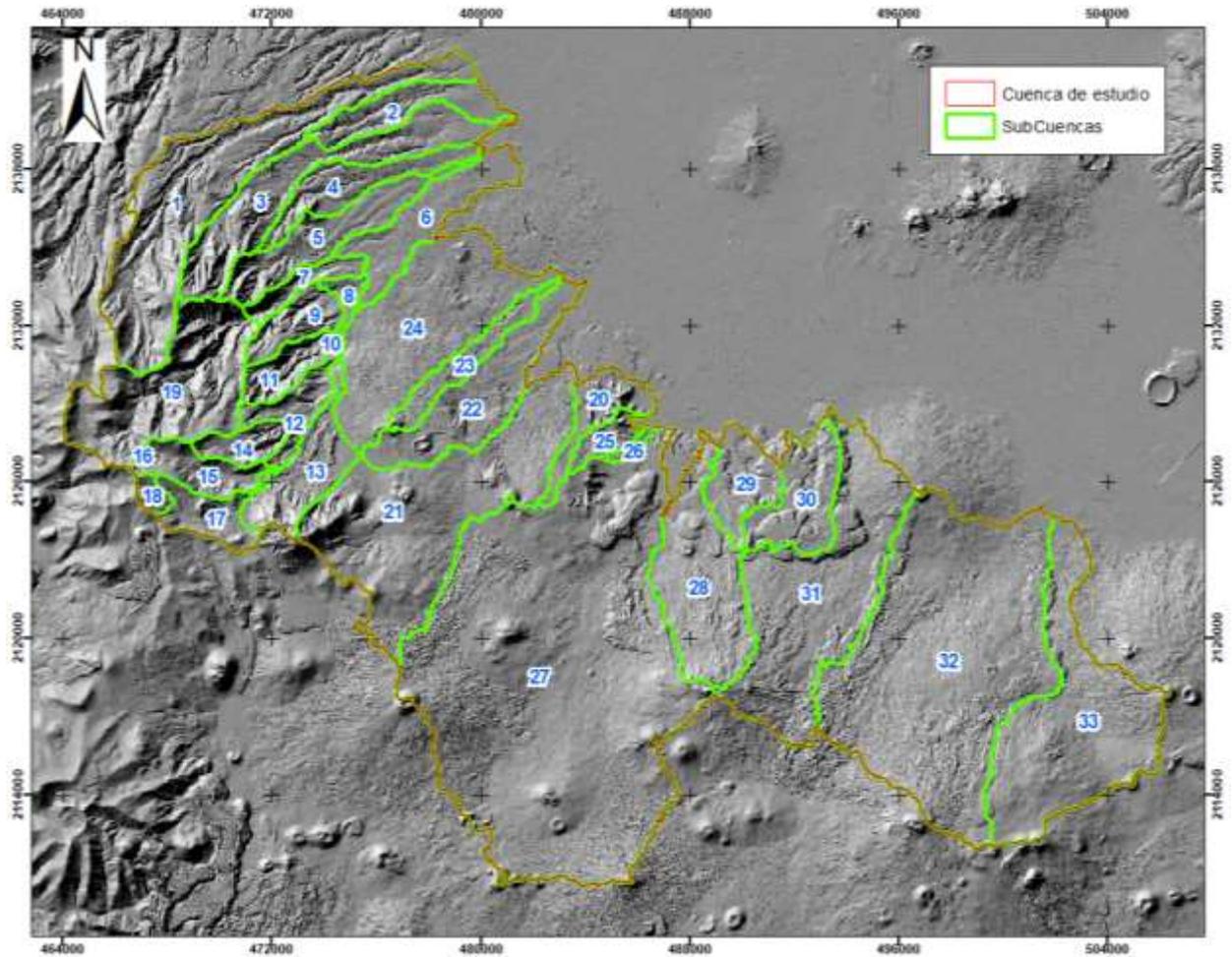
#### 147 **10.2.4. Subcuencas**

148 Se obtuvieron 33 subcuencas de las cuales 16 pertenecen a la Sierra de las Cruces

149 correspondiente a 163.7 kilómetros cuadrado y 17 subcuencas al Complejo Volcánico de

150 Chichinautzin que cubren 450.3 kilómetros cuadrados. Se observa que el 73.3% del área de

151 estudio pertenece al complejo y un 26.3% a la Sierra de las Cruces.



152  
153

Figura 10-15 Subcuenclas (INEGI, 2019c)

154 Las subcuenclas de mayor extensión en la Sierra de las Cruces son la Subcuenca 1 y la  
 155 Subcuenca 19 con áreas de 36.99 y 26.68  $km^2$  respectivamente. Por el lado del Complejo  
 156 Volcánico de Chichinautzin la Subcuenca 27 ocupa el 29% de la zona con 130  $km^2$  seguido  
 157 por la Subcuenca 32 con 75.6  $Km^2$ .

Subcuenca	Área $km^2$	%	Zona	Subcuenca	Área $km^2$	%	Zona
1	36.99	23	Sierra de las Cruces	6	12	3	Complejo Volcánico Chichinautzin
2	8.52	5		8	1.8	0	
3	20.38	12		10	0.1	0	
4	9.09	6		20	6.5	1	
5	12.45	8		21	45	10	
7	3.82	2		22	17.2	4	
9	5.88	4		23	6.3	1	
11	4.9	3		24	31.2	7	

12	5.94	4		25	3.1	1
13	10.69	7		26	0.8	0
14	4.12	3		27	130.4	29
15	6.55	4		28	22.1	5
16	0	0		29	8.1	2
17	6.26	4		30	11.4	3
18	1.45	1		31	40.4	9
19	26.68	16		32	75.6	17
				33	38.2	8
Total	163.72			Total	450.3	

158

*Tabla 10-10. Distribución de Subcuencas en el Suelo de Conservación*

159

### **10.3. Resultados Fase 3**

160

#### **10.3.1. Modelo Hidrológico Conceptual**

161

##### 10.3.1.1. Geología y estructural

162

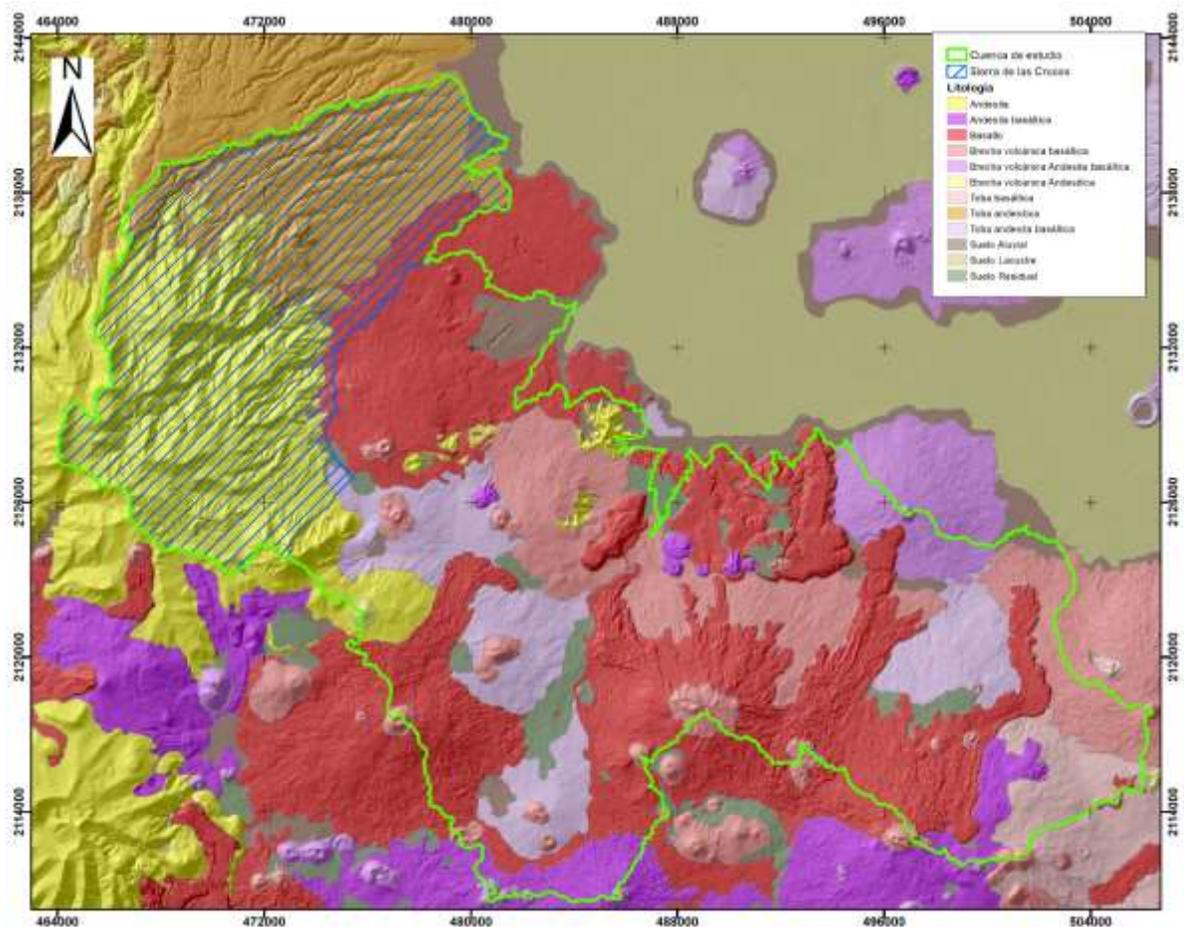
Se definieron 3 unidades ígneas predominantes en superficie en el área de estudio: Andesitas,

163

Andesitas Basálticas y Basaltos. De igual manera, dentro de las unidades se diferenciaron las

164

brechas y las tobas debido a que afectan las propiedades hidráulicas de las mismas.



165

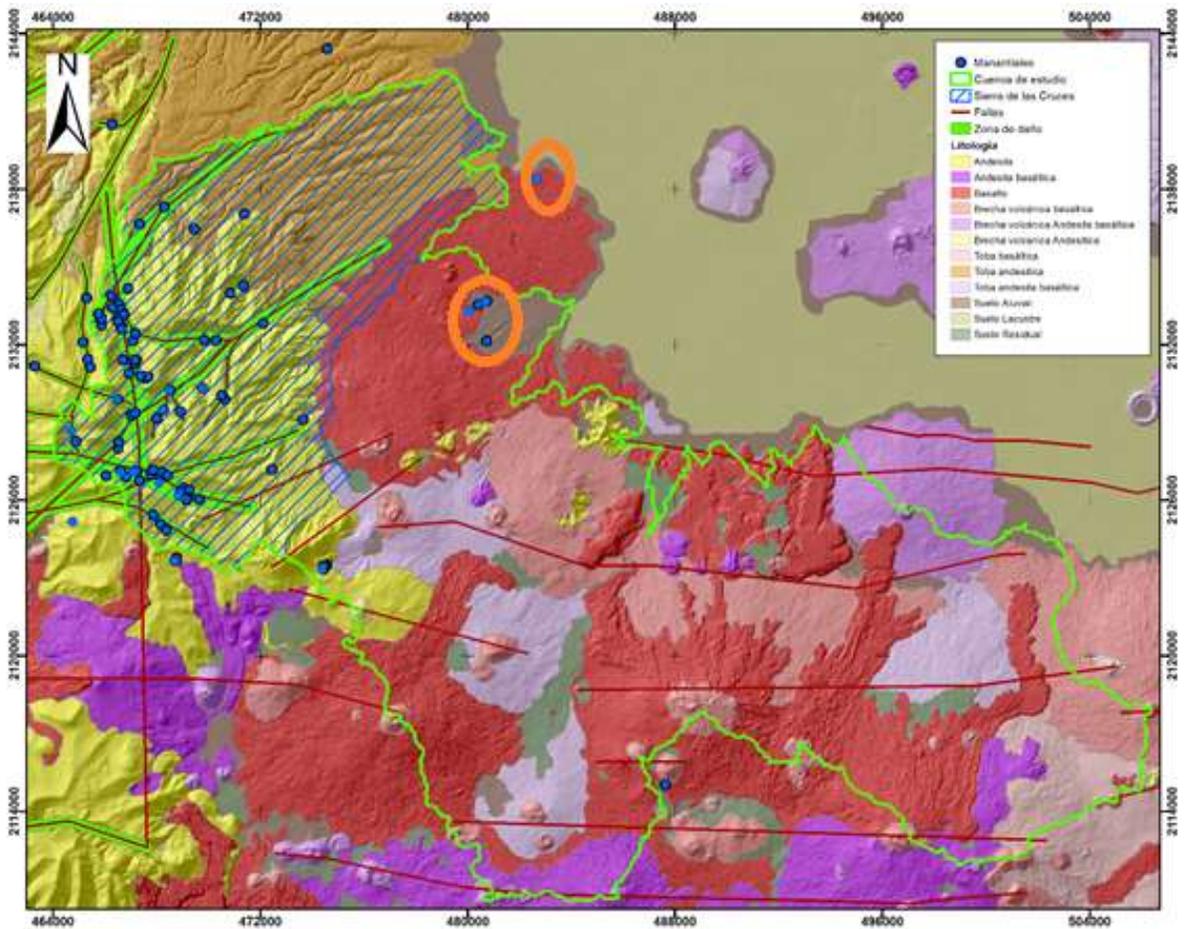
166

*Figura 10-16 Geología reclasificada ( Arce et al., 2019; INEGI, 2019c)*

167

La litología predominante en la Sierra de las Cruces (área rayada) son la Andesita y la Toba Andesítica, mientras que el en el Complejo Volcánico de Chichinautzin predominan las litologías de composición basáltica. Estructuralmente se puede apreciar la alta densidad de disecciones presentes en la Sierra de las Cruces caracterizadas por la interacción con corrientes de agua, así como patrones de alineamiento. Con respecto a Chichinautzin, se observan geoformas características de ambientes volcánicos y no se logran apreciar lineamientos ni evidencia de ríos continuos.

173



174

175 *Figura 10-17 Manantiales, zona de fallas* ( Arce et al., 2019; García-Palomo et al., 2008; GRUPO DE INGENIERÍA EN  
 176 CONSULTORÍA Y OBRAS, 2018; INEGI, 2019c)

177 En la Figura 10-17 se pueden apreciar las fallas propuestas por Arce et al. (2019) y García-  
 178 Palomo (2008) para la zona de estudio. Además, algunos lineamientos en la Sierra de las  
 179 Cruces que pueden sugerir fallas y la localización de los manantiales identificados. Se puede  
 180 observar que existe alta densidad de manantiales en la Sierra de las Cruces los cuales  
 181 conforman patrones de lineamientos entre ellos que siguen los rasgos estructurales de la  
 182 Sierra. Del mismo modo, se observa que otros manantiales afloran en el contacto de unidades  
 183 litológicas. En el caso del Complejo Volcánico de Chichinautzin existe baja presencia de  
 184 manantiales y los presentes se encuentran en contactos litológicos en la parte baja (aros  
 185 naranjas)

186 **10.3.2. Modelo**

187 El resultado fue un modelo de lluvia escorrentía para el periodo 2019-2020 con 4 años de  
 188 calentamiento (2015-2018). Se estableció que solo se tuvieran en cuenta unidades hídricas  
 189 de respuesta en las cuales el tipo de suelo, cobertura y uso de suelo, además de la pendiente  
 190 cubrieran una extensión superior del 10% por Subcuenca. Con la anterior restricción,  
 191 resultaron 439 unidades hídricas de respuesta. El uso de suelo predominante en las unidades  
 192 hídricas de respuestas es la clase CORN con 44.47% de cobertura, seguido por FRSE con un  
 193 37.27% de territorio y 17.88% corresponde a zonas urbanas y construidas. Con porcentajes  
 194 inferiores al 1% se encuentran las clases SIDE y OAK.

Uso de Suelo	Clave	Área (km2)	% Área
Bosques de coníferas	FRSE	228.88	37.27
Tierras Agrícolas	CORN	273.05	44.47
Urbano y Construido	URBN	109.79	17.88
Pastizales y otra vegetación herbácea	SIDE	0.95	0.16
Bosques Latifoliados	OAK	1.36	0.22

195 *Tabla 10-11. Distribución uso y cobertura en las HRU*

196 De los 66 polígonos de suelo presentes en el área de estudio solo 22 superan el 10% de  
 197 cobertura. Las clases Hh2 y Hh1 ocupan el 19.59% y 14.52% de las unidades hídricas de  
 198 respuesta, seguidos por las clases Th2 con 11.39%, I2 con un 7.97% y Th3 con un 7.28%.

Tipo de Suelo	Área (km2)	% Área
H12	14.9	2.42
H13	8.3	1.35
Th2	70.0	11.39
Th3	44.7	7.28
Hh1	89.2	14.52
Hh2	120.3	19.59
Hh3	7.2	1.17
I1	38.1	6.2
I2	49.0	7.97
I3	25.9	4.22
Hh0	4.4	0.71
Th4	10.8	1.76
Th1	2.5	0.41
Th5	9.8	1.59
Tm2	67.2	10.95
Tm3	0.5	0.08

14	8.4	1.37
15	6.2	1.02
16	10.1	1.64
17	11.7	1.91
18	12.5	2.04
Be2	2.5	0.41

Tabla 10-12. Distribución de los tipos de suelo en las HRU

199

200

### 10.3.3. Calibración

201

En el proceso de calibración se utilizaron los caudales medidos en campo y se contrastaron con los datos obtenidos por el modelo. Se utilizaron los caudales medidos en los Ríos Magdalena, Eslava y Viborillas los cuales se ubican en las subcuencas 19, 14 y 18 respectivamente.

202

203

204

205

Con el propósito de evaluar la capacidad de representar la realidad con variables obtenidas de información secundaria a partir de nuevas técnicas, como los parámetros hidráulicos y la profundidad del suelo, y teniendo en cuenta que el alcance del proyecto, la calibración se llevó a cabo modificando las variables hidrogeológicas **tiempo de retraso de agua subterránea, recarga al acuífero subterráneo y porcentaje de evaporación de agua subterránea.** Del mismo modo, en las HRU se calibraron el **tiempo de retardo de flujo lateral,** y el **máximo almacenamiento del dosel.**

206

207

208

209

210

211

212

Para el tiempo de retraso de agua subterránea que es el tiempo que se demora el agua en pasar del suelo y convertirse en recarga el valor final es de 60 días para el Suelo de Conservación, el porcentaje de recarga al acuífero subterráneo para las subcuencas localizadas en la Sierra de las Cruces es de 0 y para el Complejo Volcánico de Chichinautzin es de 100% teniendo en cuenta el modelo hidrológico conceptual propuesto. El porcentaje de evaporación de agua subterránea se modificó a 0.2. Con respecto al tiempo de retardo de flujo lateral el valor asignado es de 30 días y el máximo almacenamiento del dosel es de 80 mm para los bosques de aciculifolias y escuamifolias.

213

214

215

216

217

218

219

220

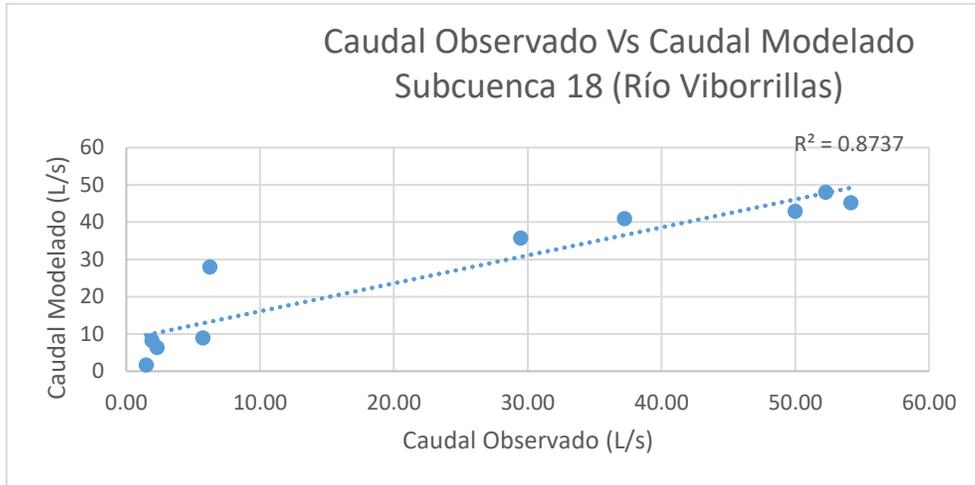
Los valores obtenidos por el modelo para el Río Viborillas presentan un buen ajuste con respecto a los valores obtenidos en campo con  $R^2$  de 0.87 ( Figura 10-18). Con respecto al Río Magdalena, el  $R^2$  calculado es de 0.9 considerándose un buen ajuste (Figura 10-19). Sin embargo, el modelo sobreestima los caudales calculados para la cuenca del Río Eslava presentando un ajuste malo con  $R^2$  de 0.01 ( Figura 10-20).

221

222

223

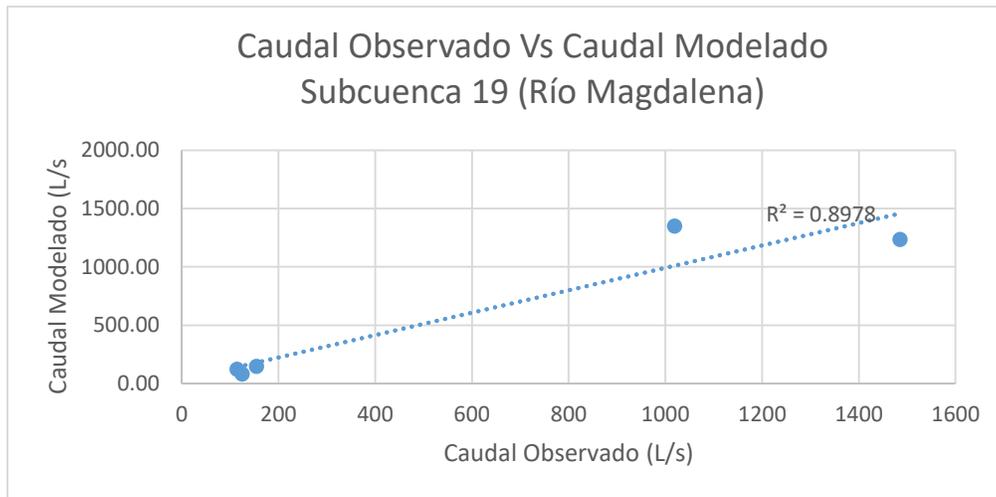
224



225

226

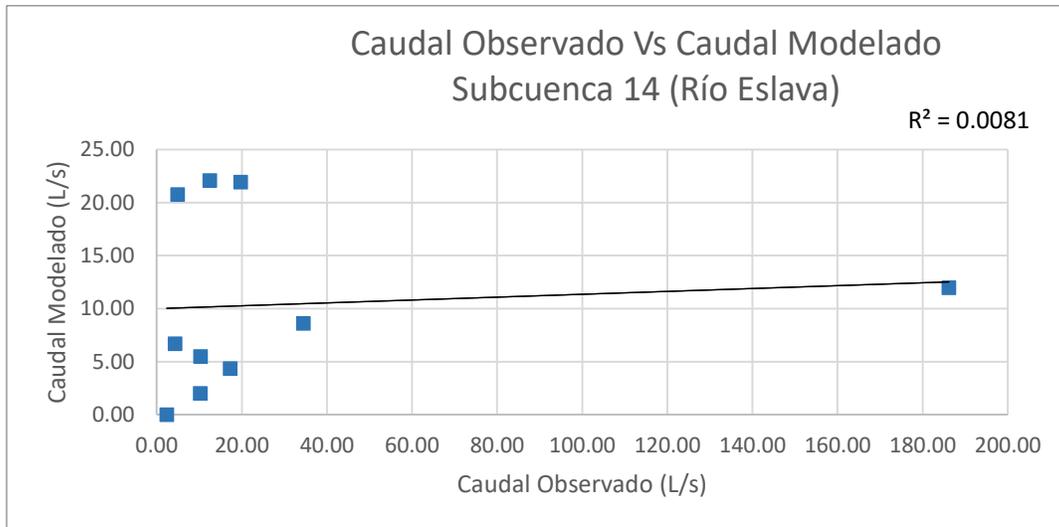
Figura 10-18 Ajuste Subcuenca 18



227

228

Figura 10-19 Ajuste Subcuenca 19



229

230

Figura 10-20 Ajuste Subcuenca 14

231

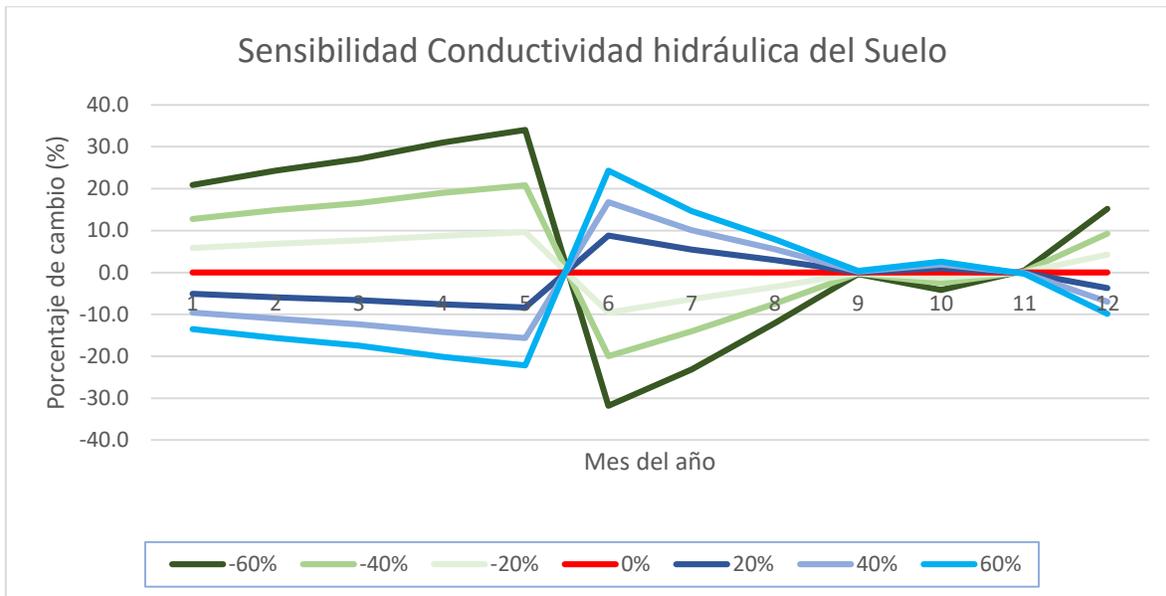
### 10.3.3.1. Sensibilidad

232

Para el análisis de sensibilidad se escogieron las variables que generaban mayores cambios

233

en los caudales. Estas variables se identificaron en el proceso de calibración.



234

235

Figura 10-21 Sensibilidad de los caudales a la Conductividad hidráulica

236

La conductividad hidráulica fue la propiedad del suelo más sensible. En la Figura 10-21 se

237

ilustra la variación del caudal según la reducción o aumento de la conductividad hidráulica

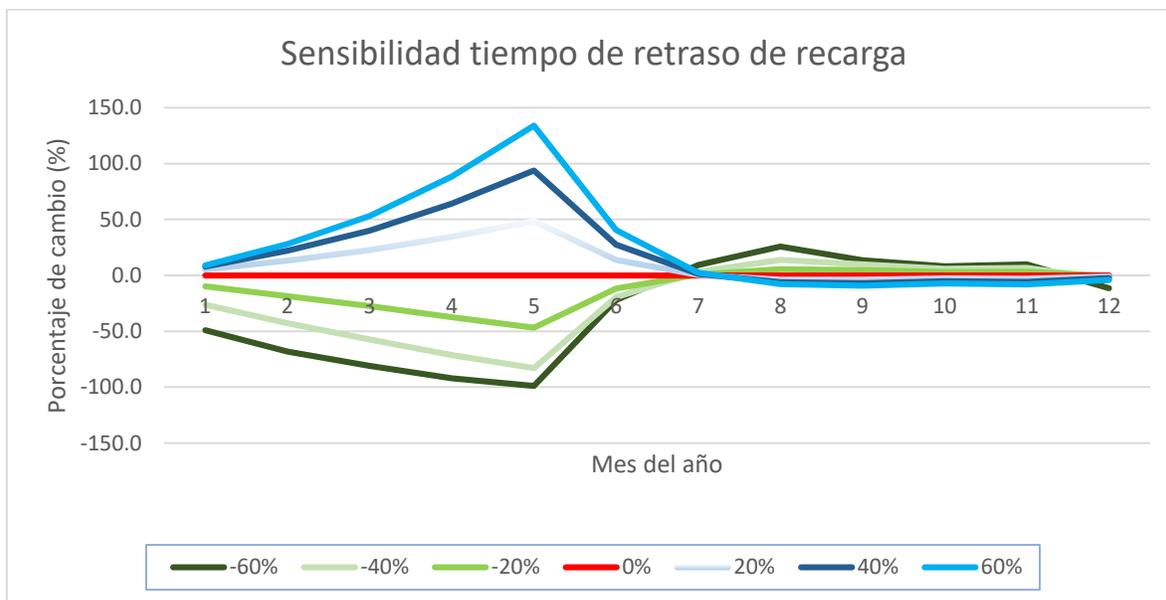
238

en rangos de 20%. Se observa que, aunque el modelo es sensible tanto aumentos o

239

disminuciones del valor de la conductividad hidráulica, la variación en el caudal es mayor

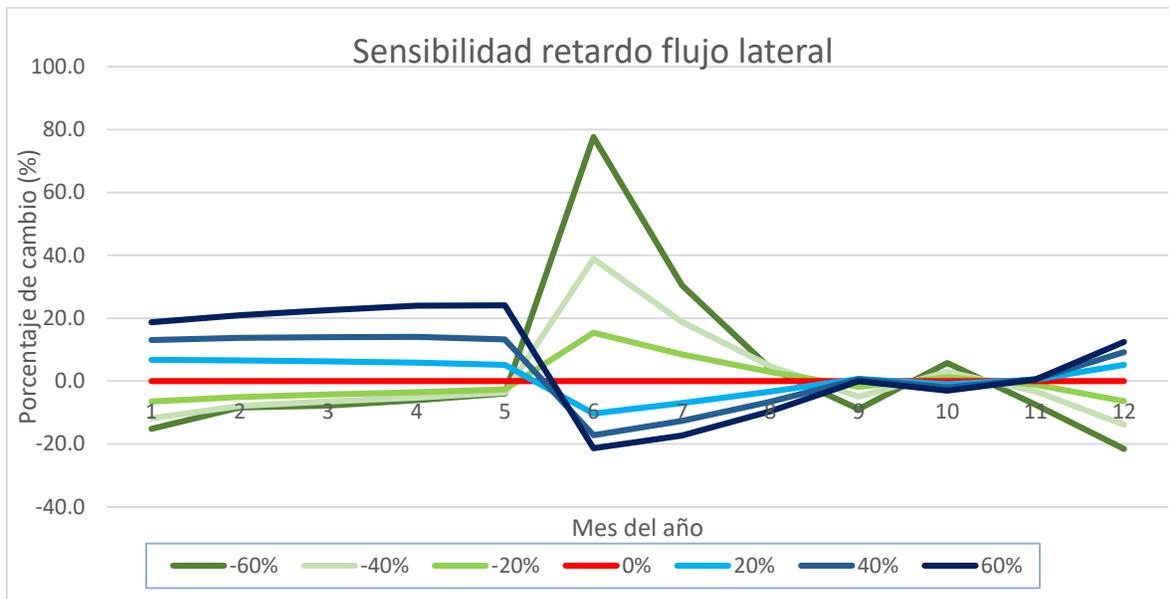
240 cuando ocurre una reducción en el valor. Sin embargo, se observa que las variaciones en el  
 241 caudal pasan de positivas a negativas a medida que el periodo de lluvia inicia para los valores  
 242 reducidos de conductividad hidráulica. El caso contrario ocurre con valores superiores de  
 243 conductividad hidráulica, en los primeros meses generan una disminución del caudal, pero  
 244 durante el periodo de lluvia se genera un aumento de caudal y con el paso de los meses  
 245 disminuye la sensibilidad.



246

247 *Figura 10-22 Sensibilidad de los caudales al tiempo de retraso de recarga*

248 En las variables hidrogeológicas se identificó el tiempo de retraso de recarga como la variable  
 249 más sensible. En la Figura 10-22 Sensibilidad de los caudales al tiempo de retraso de recarga  
 250 se observa el comportamiento de caudal con respecto aumentos o disminuciones del tiempo  
 251 de recarga. En este caso existe una relación directamente proporcional en la cual un aumento  
 252 en el tiempo de retardo genera un aumento en el valor del caudal y viceversa. Se observa un  
 253 aumento en la sensibilidad en los primeros meses y posteriormente en el mes de mayo inicia  
 254 una disminución de la sensibilidad.



255

256 *Figura 10-23 Sensibilidad de los caudales al retardo flujo lateral*

257 El flujo lateral presenta mayor sensibilidad en las variables correspondientes a las unidades  
 258 hídricas de respuesta. Se observa una relación directamente proporcional entre el retardo y el  
 259 caudal. Sin embargo, en los primeros meses existe mayor sensibilidad con el aumento del  
 260 retardo que con la disminución del mismo. No obstante, después del mes de mayo la  
 261 sensibilidad generada por la reducción del tiempo de retraso es mucho mayor. A medida que  
 262 se avanza al mes de agosto, la variable pierde sensibilidad y la vuelve a ganar después del  
 263 mes de octubre.

264 Debido a la notable relación entre el periodo de lluvia y la sensibilidad de las variables  
 265 escogidas se presenta la variación de la precipitación y almacenamiento de agua en el suelo  
 266 durante el periodo de monitoreo en la Figura 10-24.

267



268

269 *Figura 10-24 Precipitación y almacenamiento de agua en el Suelo de Conservación*

270 **10.3.3.2. Percolación y recarga**

271 Teniendo en cuenta el alcance del proyecto, se extrajo los datos relevantes de la extensa  
 272 información generada por SWAT durante la modelación para el periodo de monitoreo en  
 273 campo. En la Tabla 10-13 y Tabla 10-14 se observan el volumen de agua que se recarga  
 274 mensualmente y el volumen de percolación que ocurre en el Complejo Volcánico de  
 275 Chichinautín (CVC) y La Sierra de las Cruces (SC). Es importante aclarar que SWAT genera  
 276 un acuífero somero y un acuífero profundo para la modelación, por lo tanto, el valor de  
 277 recarga que se menciona en este apartado, hace referencia al volumen total de agua que llega  
 278 a los acuíferos; sin diferenciar cuánta agua termina en el acuífero más profundo.

279 La percolación tanto en la Sierra de las Cruces, como el Complejo Volcánico de  
 280 Chichinautín ocurre del mes de mayo al mes de noviembre, siendo julio el mes con mayor  
 281 percolación. Aunque en los meses de agosto y octubre ocurren dos picos de percolación en  
 282 ambas zonas, octubre es el segundo mes de mayor percolación para la Sierra de las Cruces y  
 283 agosto lo es para el Complejo Volcánico de Chichinautín.

284 La recarga de agua subterránea ocurre desde el mes de julio siendo los meses de agosto y  
 285 septiembre los de mayor recarga para el Complejo Volcánico de Chichinautín y el mes de  
 286 mayo el de menor aporte. En la Sierra de las Cruces, en el periodo entre octubre y noviembre  
 287 ocurre la mayor recarga y de igual manera, el mes de mayo presenta los valores más bajos de

288 recarga. La Sierra de las Cruces reporta una recarga de un poco más de 34 millones de metros  
 289 cúbicos durante el periodo de monitoreo, mientras el Complejo Volcánico de Chichinautzin  
 290 aporta 61 millones de metros cúbicos aproximadamente.

Mes	CVC			CVC Volumen	
	Percolación promedio (mm)	Recarga Promedio (mm)	ÁREA $km^2$	Percolación $m^3$	Recarga ( $m^3$ )
3	0	0	450.4	-	-
4	0	0	450.4	-	-
5	0	0	450.4	-	-
6	13.61	0	450.4	6,130,331.63	-
7	54.2	15.62	450.4	24,409,606.36	7,035,699.31
8	31.13	29.5	450.4	14,017,847.49	13,287,183.07
9	8.55	22.54	450.4	3,849,093.69	10,150,831.59
10	24.26	22.03	450.4	10,927,595.54	9,921,075.26
11	5.81	18.92	450.4	2,615,150.81	8,522,169.22
12	0	11.87	450.4	-	5,345,605.38
<b>2019</b>	<b>137.56</b>	<b>120.48</b>	<b>450.4</b>	<b>61,949,625.51</b>	<b>54,262,563.83</b>
1	0.61	7.2	450.4	275,461.52	3,241,729.82
2	0	4.2	450.4	-	1,892,024.19
3	0	2.73	450.4	-	1,228,400.50
4	0	1.59	450.4	-	714,554.47
<b>2020</b>	<b>0.61</b>	<b>15.71</b>	<b>450.4</b>	<b>275,461.52</b>	<b>7,076,708.98</b>

291

Tabla 10-13. Percolación y recarga estimada en el tiempo de monitoreo en el Complejo Volcánico de Chichinautzin

Mes	SC			SC Volumen	
	Percolación promedio (mm)	Recarga Promedio (mm)	ÁREA $km^2$	Percolación $m^3$	Recarga $m^3$
3	0	0	163.6	-	-
4	0	0	163.6	-	-
5	0	0	163.6	-	-
6	6.25	0	163.6	1,022,409.67	-
7	65.11	14.99	163.6	10,656,626.74	2,453,174.38
8	48.33	36.36	163.6	7,909,215.22	5,951,562.95
9	26.25	31.2	163.6	4,295,660.60	5,106,239.06
10	60.9	40.32	163.6	9,966,410.96	6,599,647.16
11	9.29	37.25	163.6	1,520,075.75	6,096,355.38
12	0	23.32	163.6	-	3,817,346.48
<b>2019</b>	<b>216.13</b>	<b>183.44</b>	<b>163.6</b>	<b>35,370,398.94</b>	<b>30,024,325.41</b>

1	0	13.91	163.6	-	2,277,069.86
2	0.12	7.92	163.6	20,309.02	1,296,917.00
3	0	5.15	163.6	-	843,179.92
4	0	3	163.6	-	490,472.78
2020	0.12	29.99	163.6	20,309.02	4,907,639.56

292

*Tabla 10-14 Percolación y recarga estimada en el tiempo de monitoreo en Sierra de las Cruces*

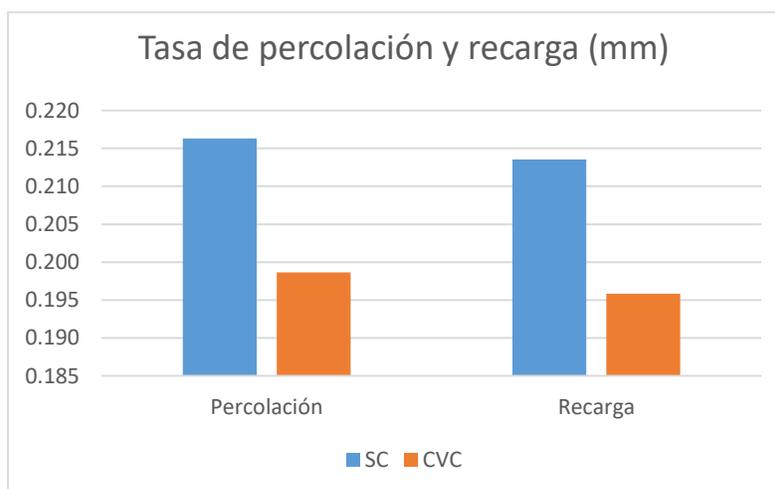
293 En la tabla Tabla 10-15 se presenta la precipitación reportada en el Suelo de Conservación  
 294 en la Sierra de Las Cruces (SC) y el Complejo Volcánico de Chichinautzin (CVC) durante  
 295 el periodo de modelación.

Precipitación (mm)		
Año	CVC	SC
2019	682.6	991.7
2020	58.5	73.9

296

*Tabla 10-15 Precipitación anual Suelo de Conservación*

297 En la Figura 10-25 se observa la relación entre el volumen de percolación y recarga, y el  
 298 área.



299

300

*Figura 10-25 Tasa de percolación y recarga en el Suelo de Conservación.*

301 Por medio de SWAT se estimó el caudal del Río Magdalena y el aporte de agua subterránea  
 302 como caudal base durante el periodo de modelación (Tabla 10-16).

Mes	Volumen total (m <sup>3</sup> )	% agua subterránea	Volumen agua subterránea (m <sup>3</sup> )
1	1,043,772.48	80	835,017.98
2	565,125.12	85	480,356.35
3	346,852.80	88	305,230.46
4	184,680.00	93	171,752.40

5	105,261.12	95	99,998.06
6	410,832.00	17	69,841.44
7	1,932,465.60	10	193,246.56
8	3,447,100.80	22	758,362.18
9	3,175,200.00	33	1,047,816.00
10	4,116,700.80	33	1,358,511.26
11	3,317,760.00	45	1,492,992.00
12	1,835,507.52	63	1,156,369.74
2020			
1	1,015,649.28	73	741,423.97
2	529,320.96	77	407,577.14
3	316,854.72	85	269,326.51
4	235,457.28	66	155,401.80
total	22,578,540.48		9,543,223.87

303 *Tabla 10-16 Estimación de aporte agua subterránea para el Río Magdalena*

### 304 **10.3.1. Escenario hipotético**

#### 305 10.3.1.1. Condiciones actuales

306 En la Tabla 10-17 y Tabla 10-18 se observa los valores de percolación y recarga que ocurren  
307 en el Suelo de Conservación en el Complejo Volcánico de Chichinautzin discretizados con  
308 la distribución espacial actual del uso del Suelo. Es importante aclarar que los volúmenes de  
309 recarga y percolación presentados, responden a las condiciones topográficas y al tipo de  
310 suelo, más que al uso de suelo. Por lo tanto, las presentaciones de las tablas por uso de suelo  
311 tienen como función ubicar al lector espacialmente ya que la presentación de información  
312 por unidades hídricas de respuesta sería extensa, confusa; y, además, permitir la comparación  
313 en la recarga por el cambio de uso del suelo.

314 Los 44,071,859.84 de metros cúbicos reportados en el uso de suelo agricultura indican que  
315 las condiciones de pendiente, tipo de suelo y altura son favorables a la percolación a pesar  
316 del uso de suelo que se le está dando. De mismo modo, los 7,639,934.22 de metros cúbicos  
317 de recarga en el uso urbano indican que pese al uso urbano el cual disminuye la infiltración,  
318 condiciones topográficas y el tipo de suelo son favorables para la percolación.

Mes	CVC							
	Promedio Percolación (mm)				Promedio Volumen Percolación ( $m^3$ )			
	URBN	CORN	FRSE	OAK	URBN	CORN	FRSE	OAK

3	0	0	0	0	-	-	-	-
4	0	0	0	0	-	-	-	-
5	0	0	0	0	-	-	-	-
6	14.33	15.37	11.8	6.19	822,286.94	4,016,899.59	1,538,257.82	8,408.86
7	56.24	55.83	53.16	35.73	3,227,727.69	14,589,041.78	6,927,522.56	48,511.53
8	30.17	38.03	25.7	12.99	1,731,644.24	9,936,179.83	3,348,799.57	17,637.73
9	5.32	14.93	4.32	0	305,341.69	3,902,032.24	563,513.42	-
10	22.66	35.03	13.92	8.04	1,300,392.94	9,154,471.97	1,813,955.71	10,910.86
11	4.4	8.63	3.91	2.15	252,540.72	2,253,852.99	509,300.19	2,918.46
12	0	0	0	0	-	-	-	-
2019	133.12	167.82	112.81	65.09	7,639,934.22	43,852,478.41	14,701,349.27	88,387.44
1	0	0.84	0.97	0	-	-	-	-
2	0	0	0	0	-	-	-	-
3	0	0	0	0	-	-	-	-
4	0	0	0	0	-	-	-	-
2020	0	0.84	0.97	0	0	219,381.43	126,017.57	0
Total	133.12	168.66	113.78	65.09	7,639,934.22	44,071,859.84	14,827,366.84	88,387.44

Tabla 10-17 Percolación que ocurre en uso y cobertura del Complejo Volcánico de Chichinautzin

319

320 Los valores de recarga en el Complejo Volcánico de Chichinautzin indican que las  
321 condiciones intrínsecas del suelo debido a las condiciones topográficas y edafológicas  
322 generaron más de 43 millones de metros cúbicos a pesar del uso agrícola que se le está dando.  
323 Las condiciones edafológicas cuyo uso de suelo es bosques de coníferas generaron un  
324 volumen de recarga de 14,641,113.52 de metros cúbicos en el periodo de modelación.

Mes	CVC							
	Promedio recarga (mm)				Promedio Volumen Recarga ( $m^3$ )			
	URBN	CORN	FRSE	OAK	URBN	CORN	FRSE	OAK
7	15.8	16.67	15.12	9.06	906,588.11	4,357,180.59	1,970,748.09	12,301.32
8	30.46	32.22	27.1	16.58	1,748,003.11	8,418,147.66	3,531,224.45	22,520.07
9	22.07	26.24	19.82	11.44	1,266,478.16	6,856,092.63	2,582,627.43	15,540.10
10	20.73	28.44	16.79	8.61	1,189,983.37	7,432,644.04	2,188,425.68	11,684.44
11	17.29	25.48	13.47	7.53	992,414.28	6,659,227.71	1,754,871.49	10,223.92
12	10.83	16	8.44	4.72	621,610.47	4,181,060.44	1,100,046.28	6,405.73
2019	117.18	145.05	100.74	57.94	6,725,077.50	37,904,353.07	13,127,943.42	78,675.58
1	6.46	9.71	5.22	2.81	370,797.67	2,535,949.88	680,660.67	3,821.03
2	3.66	5.67	3.15	1.59	210,101.12	1,481,182.33	410,722.51	2,165.12

3	2.38	3.68	2.05	1.04	136,405.23	961,661.49	266,669.47	1,405.66
4	1.38	2.14	1.19	0.6	79,349.03	559,391.57	155,117.45	817.57
2020	13.88	21.2	11.61	6.04	796,653.05	5,538,185.27	1,513,170.10	8,209.38
Total	131.06	166.25	112.35	63.98	7,521,730.55	43,442,538.34	14,641,113.52	86,884.96

Tabla 10-18 Recarga que ocurre en uso y cobertura Complejo Volcánico del Chihinautzin

325

326 En la Sierra de las Cruces (Tabla 10-19), las áreas cubiertas por Bosques de coníferas  
327 presentan valores de percolación por 18,764,441.95 de metros cúbicos durante el periodo de  
328 modelación. Las condiciones edafológicas en las cuales se presenta el uso urbano reporta  
329 11,425,248.09 de metros cúbicos, seguido por las condiciones edafológicas presentes en el  
330 uso agricultura con 3 millones y pastizales con 412,941.09 metros cúbicos.

331

Mes	SC				Promedio Volumen Percolación ( $m^3$ )			
	Promedio Percolación (mm)							
	URBN	CORN	FRSE	SIDE	URBN	CORN	FRSE	SIDE
3	0	0	0	0	-	-	-	-
4	0	0	0	0	-	-	-	-
5	0	0	0	0	-	-	-	-
6	5.31	21.05	3	12.24	278,464.31	247,339.90	295,872.61	11,686.29
7	65.86	82.69	59.34	137.83	3,451,080.40	971,533.76	5,848,377.04	131,604.16
8	53.15	49.72	45.23	72.45	2,784,776.10	584,126.15	4,457,579.70	69,177.20
9	26.01	41.03	22.22	61.15	1,362,831.86	482,031.24	2,190,189.53	58,392.76
10	62.12	98.11	50.4	113.35	3,254,818.14	1,152,646.66	4,967,472.47	108,234.46
11	5.6	11.43	10.2	35.45	293,277.27	134,299.32	1,004,950.60	33,846.21
12	0	0	0	0	-	-	-	-
2019	218.04	304.02	190.39	432.47	11,425,248.09	3,571,977.03	18,764,441.95	412,941.09
1	0	0	0	0	-	-	-	-
2	0	0.89	0	0	-	10,479.02	-	-
3	0	0	0	0	-	-	-	-
4	0	0	0	0	-	-	-	-
2020	0	0.89	0	0	0	10479.02	0	0
Total	218.04	304.91	190.39	432.47	11,425,248.09	3,582,456.05	18,764,441.95	412,941.09

Tabla 10-19 Percolación según uso y cobertura Sierra de las Cruces

332

333 En la Tabla 10-20 se observan los valores promedio de recarga de acuerdo a las condiciones  
334 edafológicas y topográficas de la zona y agrupados por uso y cobertura del suelo para la  
335 Sierra de las Cruces. Las condiciones edafológicas y topográficas de la zona donde la

336 cobertura es Bosques de coníferas aporta el mayor volumen de agua durante el periodo de  
 337 modelación con un valor de recarga de 18,547,631.31 de metros cúbicos. Igual que en la  
 338 percolación, las condiciones edafológicas y topográficas existentes en el uso urbano fueron  
 339 el segundo aportante en magnitud con 11,299,812.34 de metros cúbicos a pesar de las  
 340 consecuencias adversas para la infiltración debidas al uso existente. Las condiciones  
 341 topográficas y edafológicas en los usos agricultura y pastizales cierran el grupo con  
 342 3,514,033.46 y 405,992.25 de metros cúbicos de aporte respectivamente.

Mes	SC							
	Promedio recarga (mm)				Promedio Volumen Recarga (m <sup>3</sup> )			
	URBN	CORN	FRSE	SIDE	URBN	CORN	FRSE	SIDE
7	14.77	24.43	12.53	32.35	773,975.77	286,975.57	1,234,706.26	30,890.98
8	38.09	45.76	32.74	67.13	1,995,974.47	537,612.16	3,227,218.29	64,096.50
9	32.35	38.98	28.31	58.36	1,695,121.03	457,981.01	2,790,598.12	55,722.08
10	41.57	56.85	35.1	77.78	2,178,304.89	667,927.83	3,459,218.97	74,266.98
11	36.65	54.53	32.71	77.76	1,920,524.71	640,681.13	3,223,518.21	74,251.70
12	22.88	34.13	20.51	49.01	1,199,129.10	401,001.23	2,021,562.71	46,793.37
2019	186.31	254.68	161.9	362.39	9,763,029.97	2,992,178.93	15,956,822.56	346,021.61
1	13.65	20.36	12.24	29.23	715,286.62	239,198.56	1,205,876.77	27,912.84
2	7.73	11.83	6.93	16.56	405,292.27	138,989.01	683,265.44	15,815.97
3	5.02	7.73	4.5	10.75	263,140.25	90,831.27	443,614.81	10,268.35
4	2.92	4.5	2.62	6.26	153,063.23	52,835.69	258,051.73	5,973.48
2020	29.32	44.42	26.29	62.8	1,536,782.37	521,854.53	2,590,808.75	59,970.64
<b>Total</b>	<b>215.63</b>	<b>299.10</b>	<b>188.19</b>	<b>425.19</b>	<b>11,299,812.34</b>	<b>3,514,033.46</b>	<b>18,547,631.31</b>	<b>405,992.25</b>

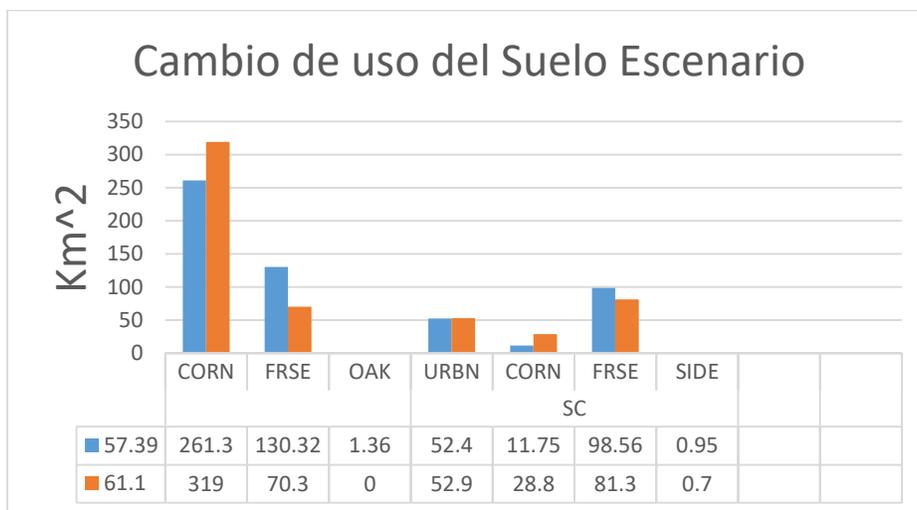
343 *Tabla 10-20 Recarga según uso y cobertura Sierra de las Cruces*

344 Se propuso una ampliación del uso urbano y el uso de agricultura a costa de pérdida de  
 345 vegetación natural. En la Tabla 10-21 se observa las ganancias o pérdidas porcentuales que  
 346 sufrieron cada uso o cobertura tanto en la Sierra de las Cruces como el Complejo Volcánico  
 347 de Chichinautzin.

348 En la Figura 10-26 se puede observar el cambio en kilómetros cuadrados de los distintos  
 349 usos del suelo en la Sierra de las Cruces y Complejo Volcánico de Chichinautzin y en la  
 350 Figura 10-27 se observa la distribución real y del escenario hipotético del uso de suelo en  
 351 la zona de estudio.

352 Los cálculos de cambio de área se realizaron por medio de sistemas de información  
 353 geográfica. Se observa que en las Sierra de las Cruces el uso agricultura aumento su extensión  
 354 en un 145% pasando de 11.75 a 28.8 kilómetros cuadrados. El uso urbano aumenta en 1% su  
 355 extensión aumentando medio kilómetro cuadrado. El uso Bosques de coníferas presentan una  
 356 disminución del 17.51%, perdiendo 17 kilómetros cuadrados aproximadamente.

357 En el Complejo Volcánico de Chichinatuzin, el uso agricultura aumenta su extensión en 22%,  
 358 ganando 60 kilómetros cuadrados aproximadamente. El uso urbano crece un 6.46% y  
 359 aumenta su extensión en 4 kilómetros cuadrados. Los Bosques latifoliados desaparecen y los  
 360 Bosques de coníferas se reducen un 46.06% perdiendo 60 kilómetros cuadrados.



361

362

Figura 10-26 Cambio de uso de Suelo Escenario hipotético (Elaboración propia)

363

		Escenario real (Km <sup>2</sup> )	Escenario 1 (Km <sup>2</sup> )	Variación (%)
CVC	URBN	57.39	61.1	6.46
	CORN	261.3	319	22.08
	FRSE	130.32	70.3	-46.06
	OAK	1.36	0	-100.00
SC	URBN	52.4	52.9	0.95
	CORN	11.75	28.8	145.11
	FRSE	98.56	81.3	-17.51
	SIDE	0.95	0.7	-26.32

364

Tabla 10-21 Cambios de área de escenario real a escenario hipotético

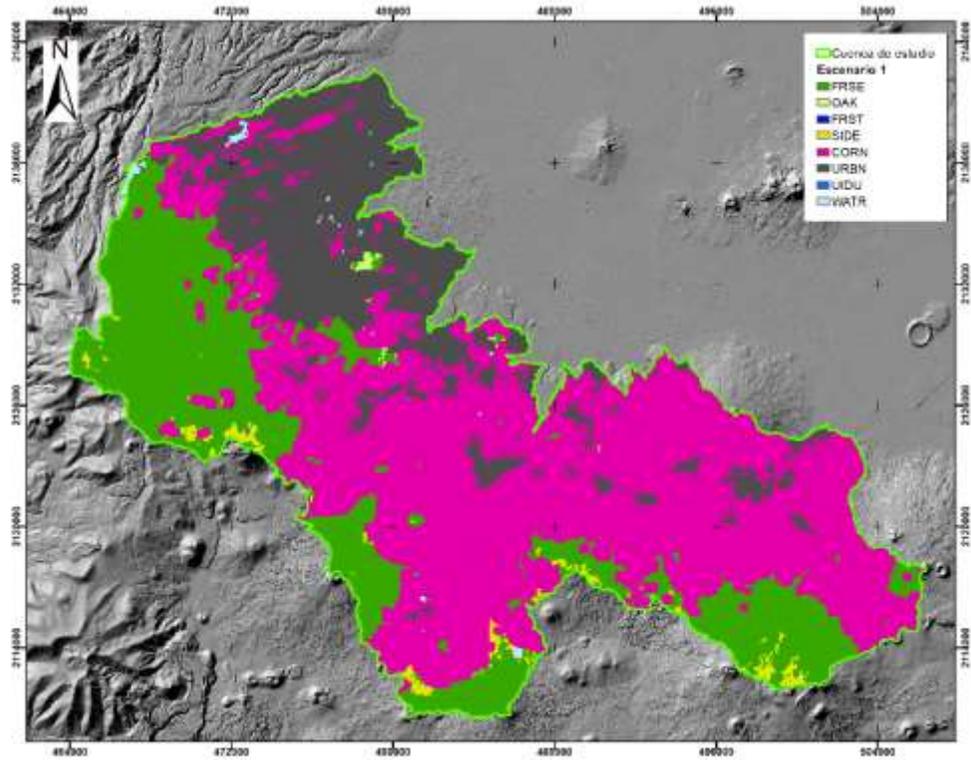
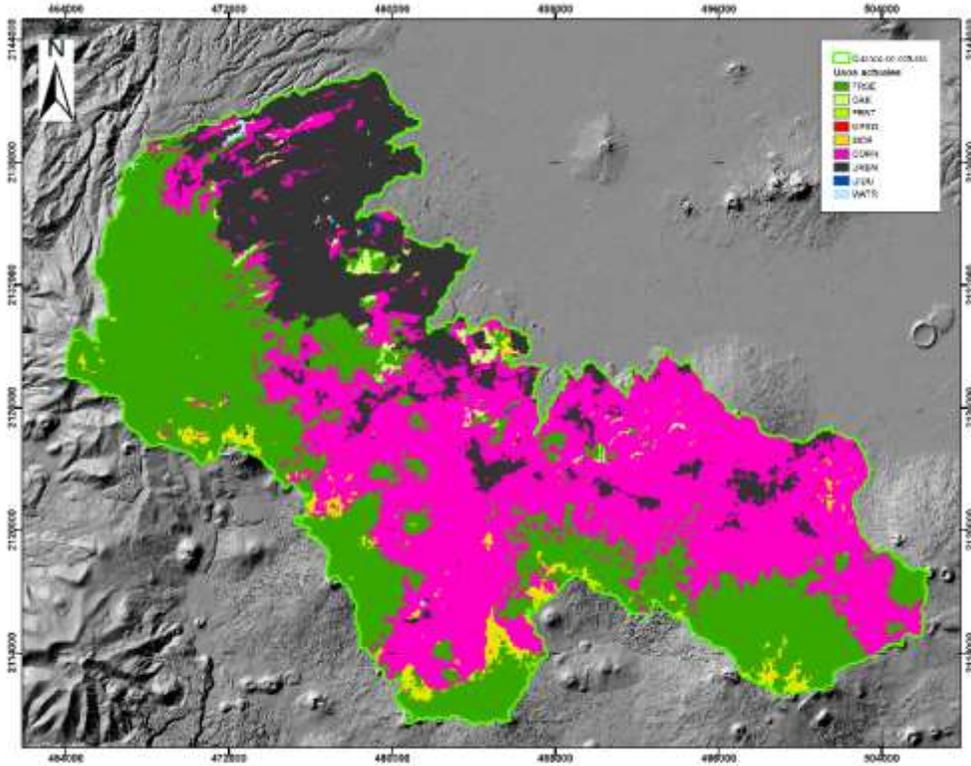


Figura 10-27 Comparación cambio de uso del Suelo Escenario1

En la Tabla 10-22 se observan los cambios en la recarga y percolación en el nuevo escenario con respecto al escenario actual en el Complejo Volcánico de Chichinautzin. En el caso de la percolación se observa una disminución del 2.4% para el año 2019. En los meses de junio, julio y agosto se observa disminución de la percolación, mientras que en los meses de septiembre, octubre y noviembre los valores de percolación son mayores que en el escenario real. Para el año 2020 existe una disminución del 47%, este valor tan alto se debe a que el modelo solo abarca los primeros 4 meses del año y no llega al periodo de lluvia.

En el caso de la recarga, se presenta un aumento de 3.5 millones de metros cúbicos para el año 2019. Los meses de julio y agosto presentaron un incremento del 44.64% y 29.53% respectivamente lo que compenso la perdida de los otros meses dejando una disminución total de -2.82%.

Meses	CVC					
	Percolación (m <sup>3</sup> )	Percolación Esc1 (m <sup>3</sup> )	% de cambio	Recarga (m <sup>3</sup> )	Recarga Esc 1	% de cambio
6	6,130,331.63	5,565,286.50	-9.22			
7	24,409,606.36	23,542,924.65	-3.55	7,035,699.31	10,176,733.72	44.64
8	14,017,847.49	13,274,706.52	-5.30	13,287,183.07	17,211,282.91	29.53
9	3,849,093.69	4,106,177.80	6.68	10,150,831.59	9,721,802.66	-4.23
10	10,927,595.54	11,124,915.48	1.81	9,921,075.26	9,756,048.03	-1.66
11	2,615,150.81	2,841,826.77	8.67	8,522,169.22	7,779,109.36	-8.72
12	-	-		5,345,605.38	3,073,224.65	-42.51
2019	61,949,625.52	60,455,837.72	-2.41	54,262,563.83	57,718,201.33	6.37
1	275,461.52	145,911.11	-47.03	3,241,729.82	1,179,786.06	-63.61
2	-	-	-	1,892,024.19	458,550.28	-75.76
3	-	-	-	1,228,400.50	187,195.55	-84.76
4	-	-	-	714,554.47	67,550.18	-90.55
2020	275,461.52	145,911.11	-47.03	7,076,708.98	1,893,082.07	-73.25
Total	62,225,087.04	60,601,748.83	-2.61	61,339,272.81	59,611,283.40	-2.82

Tabla 10-22. Respuesta al escenario hipotético en el Complejo Volcánico de Chichinautzin

En la Sierra de las Cruces (Tabla 10-23) todos los meses presentaron una disminución en la percolación siendo junio, noviembre y julio los meses de mayor disminución. La disminución para el año 2019 fue de 5.92%. Para el año 2020 se reporta en los primeros 4 meses una disminución del 50.8% en la percolación.

La recarga para el 2019 sufre una reducción de 2,086,930.23 metros cúbicos de agua que representa una disminución el 6.02%.

Meses	SC					
	Percolación (m <sup>3</sup> )	Percolación (m <sup>3</sup> )	% de cambio	Percolación (m <sup>3</sup> )	Percolación (m <sup>3</sup> )	% de cambio
4	-	-		-	-	
5	-	-				
6	1,022,409.67	903,737.34	-11.61			
7	10,656,626.74	9,790,582.95	-8.13	2,453,174.38	2,233,061.58	-8.97
8	7,909,215.22	7,574,385.23	-4.23	5,951,562.95	5,553,837.85	-6.68
9	4,295,660.60	4,026,322.86	-6.27	5,106,239.06	4,790,134.82	-6.19
10	9,966,410.96	9,613,555.53	-3.54	6,599,647.16	6,244,127.00	-5.39
11	1,520,075.75	1,366,236.06	-10.12	6,096,355.38	5,778,898.19	-5.21
12	-	-		3,817,346.48	3,617,421.76	-5.24
2019	35,370,398.94	33,274,819.97	-5.92	30,024,325.41	28,217,481.20	-6.02
1	-	-		2,277,069.86	2,157,807.92	-5.24
2	20,309.02	9,994.67	-50.79	1,296,917.00	1,225,944.05	-5.47
3	-	-		843,179.92	796,518.32	-5.53
4	-	-		490,472.78	463,323.22	-5.54
2020	20,309.02	9,994.67	-50.79	4,907,639.56	4,643,595.18	-5.38
Total	35,390,707.96	33,284,814.64	-50.79	34,931,964.97	32,861,076.38	-5.93

Tabla 10-23 Respuesta al escenario hipotético en la Sierra de las Cruces.

## 11. Discusión de resultados

### 11.1. Modelo hidrológico conceptual

La Sierra de las Cruces es un sistema alineado N-S de estrato volcanes de composición andesítica-dacítica de edades del Plioceno a Pleistoceno y se encuentra afectado por 3 sistemas de fallas normales principales (N-S, NE-SW y E-W) (García-Palomo et al., 2008). La Sierra de las Cruces presenta altas pendientes por lo que horizontes profundos de suelo son difíciles de encontrar y el material predominante inhiben los escurrimientos, indicando alta permeabilidad y tasa de infiltración (Durazo y Farvolden, 1989; García-Palomo et al., 2008).

Los manantiales en la Sierra de las Cruces presentan arreglos lineales orientados en la misma dirección de los sistemas de fallas identificados por (García-Palomo et al., 2008). De igual manera, presentan flujo durante todo el año aun en temporada seca y aunque su caudal se ve

favorecido en periodos de lluvias indicando una influencia local, su linealidad y aporte constante durante el año sugieren que la presencia de la alta densidad de manantiales se debe al ascenso por zonas de falla siendo el control estructural el más predominante en la zona (Kresic y Stevanovic, 2009). La presencia de manantiales por encima del Río Magdalena nos señala que el flujo de agua hacia los manantiales está regido por una estructura de roca definida (Meinzer, 1927).

De acuerdo a Custodio (2007), los manantiales presentes en la parte alta de estructuras volcánicas pueden ser colgados y tener primordialmente influencia local o ser salidas de un cuerpo principal de agua subterráneas que se encuentra en el núcleo de la unidad geológica y se moviliza por capas permeables y zonas fracturadas en las partes altas. Los manantiales afloran principalmente en zonas de daño en las cuales existen mayor permeabilidad y conductividad y los núcleos de falla presentan baja permeabilidad aumentando el nivel freático en zonas aledañas (Caine et al., 1996). Durazo y Farvolden, (1989) clasifican los manantiales de la Sierra de las Cruces como colgados cuya fuente es un acuífero somero. Esto implica que los manantiales presentes en las partes altas de la Sierra de las Cruces están fuertemente influenciados por el sistema de fallas las cuales se van cerrando a medida que aumenta la profundidad disminuyendo la permeabilidad (Bense et al., 2013). La disminución de la conductividad a profundidad de la roca privilegia la conductividad horizontal sobre la vertical formando el acuífero somero.

Chichinautzin presenta alturas hasta 700 metros más altos que el valle y está formado principalmente por flujos basáltico-andesíticos de edades cuaternario y reciente (Durazo y Farvolden, 1989). Presenta mayor permeabilidad con respecto a las montañas colindantes (Sierra de las Cruces y Santa Catarina) (Durazo y Farvolden, 1989).

La permeabilidad de los basaltos está altamente relacionada con su velocidad de enfriamiento puesto que, a mayor velocidad, mayor presencia de micro fracturas, venas y vesículas favoreciendo el paso del agua. En el complejo Volcánico de Chichinautzin la no existencia de corrientes superficiales habla de la eficiencia de infiltración del suelo y unidades geológicas allí presentes. Al no existir tributarios, el agua que se precipita se distribuirá en infiltración directa y evapotranspiración (Meinzer, 1927). Sin embargo, las lavas fracturadas por su alta permeabilidad no presentan gran capacidad de almacenamiento. Caso contrario

ocurre con las cenizas volcánicas y algunos flujos piroclásticos los cuales presentan baja permeabilidad y alta porosidad. Por lo tanto, si se comportan como un sistema serviría de almacenadores complementarios a las lavas (Kresic y Stevanovic, 2009).

Con respecto a descargas de agua subterránea, la tierra estuvo inundada en las faldas del Complejo Volcánico de Chichinautzin más precisamente en Xochimilco y Chalco hasta finales del siglo XX por la descarga de manantiales (Durazo y Farvolden, 1989). Sin embargo, para la época de los 60's se instalaron pozos en la parte sur de la cuenca, los cuales eliminaron los manantiales debido a la inversión del gradiente hidráulico por acción del bombeo (Durazo y Farvolden, 1989). Esta afirmación se puede corroborar en el trabajo de Flórez (2019) en cual, a partir de análisis de multipiezómetros se puede observar como varía la carga hidráulica en profundidad en los pozos ubicados en la parte baja del complejo Volcánico de Chichinautzin. Durazo y Farvolden, (1989).

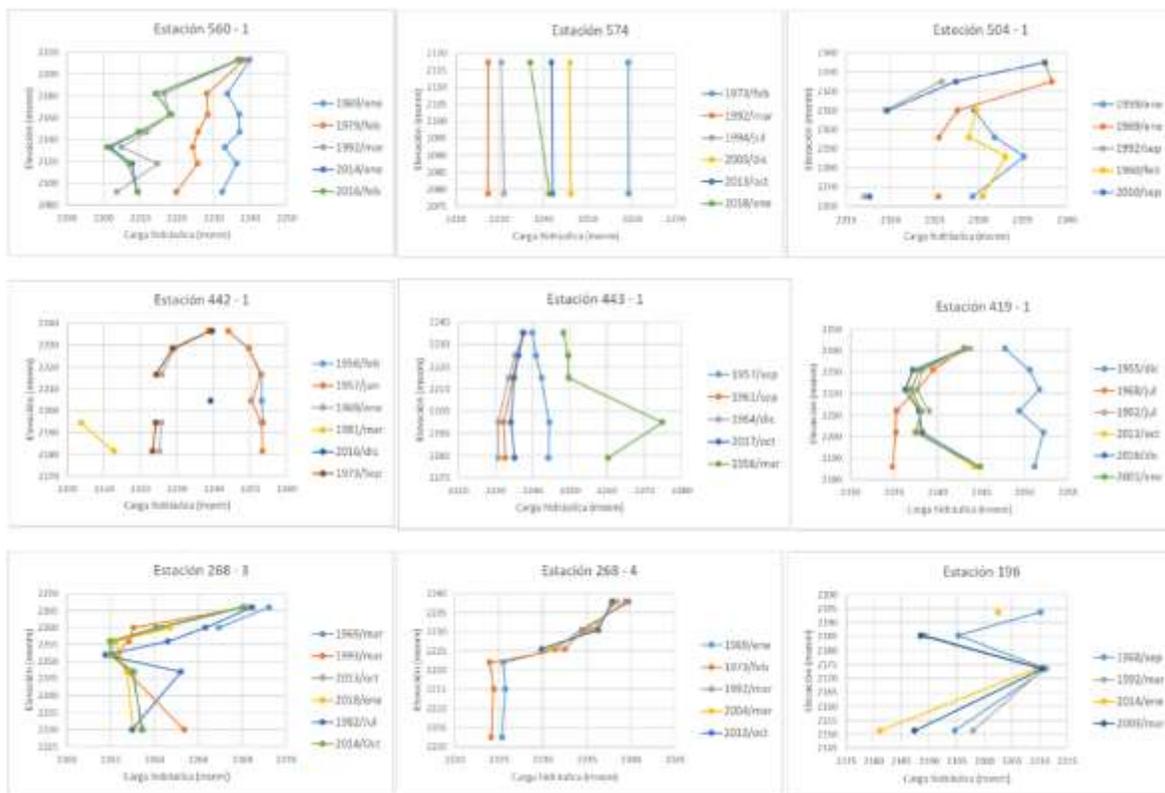


Figura 11-1 Inversión de los gradientes por la extracción de pozos. Tomado de Flórez (2019).

## **Recarga del componente de agua subterráneo de la Ciudad de México**

Según Durazo & Farvolden, (1989), la recarga en Ciudad de México ocurre en las montañas de roca volcánica las cuales son muy permeables, con nivel freático profundo en la mayoría de los casos y escurrimiento superficial leve. Sin embargo, existen diferencias estructurales, litológicas y de vegetación entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin:

- Las rocas volcánicas presentes en el Complejo Volcánico de Chichinautzin son más jóvenes que las rocas de la Sierra de las Cruces (Arce et al., 2019; Durazo y Farvolden, 1989). De acuerdo a Custodio, (2007) las rocas volcánicas más recientes tienden a presentar mayor permeabilidad con respecto a rocas más antiguas, aunque su composición sea similar.
- La Sierra de las Cruces presenta mayor altura que el Complejo Volcánico de Chichinautzin debido a su composición litológica. La composición acida de las rocas de la Sierra de las cruces genera montículos y cuerpos gruesos con regular estratigrafía, altamente afectado por fallas (Custodio, 2007).
- Extensos arboles coníferos cubren gran parte de las tierras altas de la Sierra de las Cruces, requiriendo grandes cantidades de agua para su mantenimiento. (Durazo y Farvolden, 1989).
- El nivel freático en la Sierra de las Cruces es somero, muestra de ello es la presencia de manantiales en la parte alta. El nivel freático somero está controlado por la topografía, lo que privilegia los componentes locales del sistema con poca contribución a los sistemas regionales de flujo y sus límites coinciden con las divisorias de las cuencas superficiales (Escolero, 2018). Por otra parte, en el Complejo Volcánico de Chichinautzin, la conductividad hidráulica es relativamente alta con respecto a la recarga por lo que presenta niveles freáticos profundos y alimenta el sistema regional de la Cuenca de la Ciudad de México (Escolero, 2018).

La presencia de vegetación conífera, sumado a la descarga en partes altas de aguas subterráneas en la Sierra de las Cruces, nivel freático somero controlado por la topografía, nos dice que, aunque es una zona de abastecimiento de agua para la Ciudad de México, no presenta las condiciones para ser una zona de recarga del componente principal del sistema de aguas subterráneas de la Ciudad de México.

Las montañas del Complejo Volcánico de Chichinautzin son un buen candidato como zona de recarga del acuífero principal (Durazo y Farvolden, 1989). Las propiedades edafológicas, composición litológica, nivel freático profundo constituyen al complejo volcánico, como la principal zona de recarga de agua subterránea para la Ciudad de México.

### **11.2. Modelo**

La adquisición de información primaria para la generación de los insumos de entrada, es uno de los principales problemas al momento de realizar un modelo; ya sea por la falta de bases de datos actualizadas, por la no existencia de la información o por la dificultad de ir a campo. Para la realización del modelo, la profundidad del suelo, las propiedades hídricas del suelo, la delimitación de subcuencas se obtuvieron a partir del procesamiento de información secundaria. De los tres ríos utilizados para la calibración, los ríos Magdalena y Viborillas presentaron un ajuste bueno con un  $R^2$  superior a 0.8. Sin embargo, el Río Eslava reporto un mal ajuste con un valor de  $R^2$  de 0.01. Los valores obtenidos por el modelo son mayores que los medidos en campo. El mal ajuste puede ser explicado por extracciones o modificaciones en el cauce no identificados durante el proceso de selección de monitoreo. Si bien se realizó una inspección en campo de los ríos y se intentó que río arriba de los puntos de monitoreo escogidos no existieran alteraciones antrópicas, la densa vegetación, la fuerte pendiente limitaron el acceso de la parte alta de la subcuenca. El Río Eslava se encuentra en el Parque San Nicolás y se observaron algunas tuberías a lo largo del río por lo que no existe la certeza de que no ocurra una extracción.

El resultado del buen ajuste sugiere que el uso de nuevas metodologías para la generación de insumos a partir de información secundaria como son el uso de machine learning para la predicción de profundidad de suelo, o programas como Soil water Characteristic para determinar las propiedades hidráulicas del suelo, se presentan como una alternativa para llenar esos vacíos de manera eficiente y a bajo costo.

### **11.3. Sensibilidad**

La sensibilidad de las variables conductividad hidráulica y tiempo de retraso de recarga tienden a aumentar en los primeros 5 meses. En el mes de junio ocurre una inversión en el efecto que genera el aumento o disminución de las variables, y posteriormente ocurre una disminución de la sensibilidad del modelo. En el caso de tiempo de retraso flujo lateral, los primeros 5 meses presenta una sensibilidad constante. En el mes de junio presenta la mayor variación y en los meses siguientes una disminución de la sensibilidad.

Las variaciones de la sensibilidad muestran una relación con el periodo de lluvia en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, el cual inicia en el mes de junio y finaliza en el mes de octubre, siendo julio y octubre los meses de mayor precipitación. Además, en la Figura 10-3 se observa la distribución de la precipitación y como va variando el agua retenida en el suelo durante el año. Se advierte que el periodo de mayor almacenamiento coincide con el periodo de lluvias.

Teniendo en cuenta que los valores más altos de sensibilidad ocurren en periodo de no lluvia, que iniciado el periodo de lluvia ocurre inversión en la respuesta de sensibilidad y la disminución de la sensibilidad al iniciar el periodo lluvia, se evidencia que la variación en los parámetros tiene mayor influencia en el modelo a medida que el suelo se va deshidratando y que la respuesta en la sensibilidad del modelo a las variables, depende de las condiciones de humedad que presenta el suelo.

### **11.4. Percolación y recarga**

En el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, el Complejo Volcánico de Chichinautzin ocupa el 73.4% de su extensión contra un 26.6% que corresponde a la Sierra de las Cruces. En otras palabras, el área del Complejo Volcánico de Chichinautzin es 3 veces mayor que la Sierra de las Cruces.

Sin embargo, los porcentajes de generación de percolación no presentan la misma distribución. La percolación que genera la Sierra de las Cruces corresponde al 36.3% del total generado en el Suelo de Conservación. Del mismo modo ocurre con la recarga potencial, donde el 35.5% es generada en la Sierra de las Cruces.

Haciendo la relación volumen aportado sobre área, se observa que existe una mayor tasa de rendimiento para la Sierra de las Cruces con una tasa de 0.22 metros cúbicos de percolación por metro cuadrado y 0.20 metros cúbicos de recarga por metro cuadrado. Lo que contrasta con las tasas observadas en el Complejo Volcánico de Chichinautzin que son 0.14 para percolación y 0.17 para recarga.

No obstante, los valores de precipitación reportados por el modelo en cada zona, muestran que la Sierra de las Cruces recibió 324.5 mm más de lluvia que el Complejo Volcánico de Chichinautzin en el tiempo modelado (Tabla 10-15).

Si calculamos los rendimientos en el Complejo Volcánico de Chichinautzin con la precipitación recibida por la Sierra de las Cruces los índices aumentan a 0.21 para el caso de la percolación y 0.20 para la recarga. Estos nuevos índices muestran un rendimiento similar entre las dos zonas en lo que se refiere a percolación y recarga (Figura 10-25 Tasa de percolación y recarga en el Suelo de Conservación. Figura 10-25).

Por lo anterior, se infiere que la propiedad del suelo en toda la zona de estudio presenta características similares para la generación de percolación y potencial recarga.

Sin embargo, en la fase de monitoreo en campo, se pudo verificar la presencia de manantiales y el caudal de los ríos durante el tiempo de modelado en la Sierra de las Cruces. De los resultados se observa, que, si bien los ríos y manantiales se encuentran fuertemente influenciados por los periodos de lluvia, estos permanecen descargando agua durante todo el año, incluso en los periodos secos. Al ser una zona de montaña, las entradas de agua para los ríos solo pueden provenir de la precipitación y/o de agua subterránea. Por lo tanto, los caudales de los ríos en los periodos secos deben ser alimentados por aportes de agua subterránea tanto en caudal base, como en escurrimiento superficial generado por los manantiales. Por ejemplo, en la Tabla 10-16 se calculó el aporte de agua subterránea para el río Magdalena durante el periodo modelado. Se corrobora que, en los meses de sequía, el agua subterránea es el principal aportante para el río. De los 34 millones de metros cúbicos de recarga de agua subterránea en la Sierra de las Cruces para el tiempo de modelación, un 22.6% aproximadamente es requerido para mantener los niveles del Río Magdalena.

Los manantiales son otra muestra del aporte de agua subterránea en la Sierra de las Cruces. Se estimó el aporte de los manantiales en dos subcuencas en las cuales se localizaban la mayoría de los manantiales monitoreados. Se evidencia que el aporte en el año puede superar los 500 mil metros cúbicos para subcuencas de área media y llegar hasta un aporte de más de 3 millones de metros cúbicos al año para subcuencas de mayor extensión siempre y cuando exista una alta densidad de manantiales (Tabla 10-4).

Por cuestiones de logística y accesibilidad se hizo imposible monitorear todos los manantiales. Sin embargo, Por las características similares que presenta la Sierra de las Cruces se esperaría que el aporte de agua subterránea por medio de manantiales sea un proceso constante en las subcuencas con alta densidad de afloramientos. Esta hipótesis se refuerza por las numerosas estructuras de captación encargadas de recoger el agua que aflora en los manantiales realizadas por el Sacmex para el abastecimiento de agua para la Ciudad de México y el uso de pipas de agua por la comunidad para su abastecimiento.

Por todo lo anterior, la presencia de ríos y manantiales en la Sierra de las Cruces durante todo el año, además de los volúmenes extraídos por Sacmex y la comunidad, que requieren un gran aporte de agua subterránea. Este aporte solo es posible, si gran parte de agua que se infiltra en la Sierra es utilizada en los procesos hídricos superficiales. Es decir, el agua subterránea en la Sierra de las Cruces se encuentra en un nivel freático somero, con agua de poco recorrido y rápido afloramiento, el cual favorece el desplazamiento horizontal sobre el vertical, posiblemente por la disminución de la conductividad hidráulica de la roca a profundidad por causas estructurales. Estos resultados coinciden con los resultados evidenciados en Peñuela (2007), en los cuales a partir de hidrogeoquímica e isotopos identificaron componentes locales e intermedios de rápida descarga al monitorear algunos manantiales en la Sierra de las cruces y estimar que la fuente de recarga se encuentra en la parte alta de la Sierra.

De acuerdo a lo anterior, la recarga disponible para el sistema de flujo principal de la Cuenca de México proveniente de la infiltración de la Sierra de las Cruces es muy bajo debido a los requerimientos de agua subterránea en los procesos hídricos superficiales. Este resultado contradice a Birkle et al. (1998), el cual establece a la Sierra de las Cruces como la zona de

mayor recarga de agua subterránea, seguida por Santa Catarina y el Complejo Volcánico de Chichinautzin

En el Complejo Volcánico de Chichinautzin la combinación de características geológicas, estructurales, topográficas, propiedades edafológicas y un nivel freático profundo disminuyen aporta cerca de 61 millones de metros cúbicos de agua de recarga potencial durante el tiempo de modelación, los cuales al no tener procesos hídricos superficiales que mantener servirán de recarga potencial de agua subterránea para el sistema de flujo de la Cuenca de México. Sin embargo, se hace necesario que en futuras investigaciones se integre la demanda del recurso hídrico en las áreas urbanas con el fin de entender la dinámica de oferta-oferta demanda de la Ciudad de México.

#### **11.5. Escenario hipotético**

En las condiciones actuales en el Complejo Volcánico de Chichinautzin las propiedades edafológicas y topográficas de las zonas donde el uso agricultura predomina, generan la mayor percolación y recarga potencial a pesar del uso predominante el cual podría afectar el proceso de infiltración según las técnicas agrícolas que se practiquen. De acuerdo a Seiler y Gat (2007), los procesos agrícolas pueden beneficiar el proceso de recarga porque eliminan la interceptación de agua de la vegetación natural y permite que por periodos del año los requerimientos hídricos sean nulos, dejando suelo desnudo con buena infiltración por procesos de arado. Sin embargo, debido a la tecnificación de la agricultura, el uso de maquinaria pesada conlleva a la disminución de la infiltración y por ende disminuya la recarga (Porta Casanellas et al., 2003). En la Sierra de las Cruces las características topográficas y edafológicas favorecen el proceso de infiltración a pesar de presentar una gran extensión de uso urbano el cual disminuye la capacidad del suelo para infiltrar debido a la generación de vías y construcciones con cemento ( Seiler y Gat, 2007).

En el escenario hipotético ocurre una disminución de la recarga al aumentar los usos agricultura y urbano. Este resultado sugiere que a pesar de que las condiciones edafológicas y topográficas del Suelo de Conservación son favorables para el proceso de recarga, la pérdida de cobertura vegetal natural y la expansión de usos urbanos y agrícola disminuyen la capacidad de infiltración. La disminución de la infiltración por impermeabilización del suelo

para expansión urbana es ampliamente estudiada por Seiler y Gat (2007) y evidenciada por San Miguel Villegas (2010) y Suárez y Delgado (2007).

El resultado evidencia la importancia de las coberturas naturales para conservar los valores de recarga de agua subterránea, además la expansión de la agricultura no solo impactaría en términos de cantidad, sino también en términos de calidad; puesto que en la industria el uso de agroquímicos se hace necesaria (Porta Casanellas et al., 2003; Seiler y Gat, 2007)

## **12. Conclusiones**

El buen ajuste en el proceso de calibración sugiere que el uso de nuevas tecnologías como machine learning, estadísticas y/o programas como Soil Water Characteristic se presentan como una alternativa eficiente y de bajo costo para la generación de información faltante como propiedades del suelo, clima entre otros, a partir de información secundaria. No obstante, es necesario la inclusión de más variables y la realización de más casos de estudio para aumentar la confianza en estos procedimientos.

Las propiedades edafológicas del Suelo de Conservación de la Ciudad de México son favorables para la recarga de agua subterránea del sistema de flujo principal de la Cuenca de México. Sin embargo, existen diferencias geológicas y estructurales entre la Sierra de las Cruces y el Complejo Volcánico de Chichinautzin que generan procesos hídricos diferentes y por lo tanto la recarga al sistema de flujo principal es diferenciada en el Suelo de Conservación.

El agua subterránea presenta niveles freáticos someros en la Sierra de las Cruces favoreciendo la alta densidad de manantiales y la presencia de ríos perenes como son los ríos Magdalena, Viborillas y Eslava. Los manantiales presentan alineamientos que coinciden con las principales fallas geológicas lo que muestra un control estructural. Además, el aporte de agua subterránea durante todo el año en zonas altas indica aguas subterráneas de corto recorrido y rápida descarga. Es decir, se prioriza el desplazamiento horizontal sobre el vertical posiblemente por la disminución de la conductividad hidráulica de la roca a medida que aumenta la profundidad. Por lo tanto, la recarga de agua subterránea para el sistema de flujo principal de la Cuenca de México es muy bajo en la Sierra de las Cruces debido a que la recarga potencial alimenta el sistema de flujo local el cual mantiene los ríos y manantiales durante todo el año.

El Complejo Volcánico de Chichinautzin representa tres cuartas partes del Suelo de Conservación, una litología más joven y básica que favorece al flujo vertical y presenta nivel freático profundo. Estas características la hacen una zona de recarga efectiva para el sistema de flujo principal de la Cuenca de México.

La construcción del escenario hipotético evidencia la respuesta negativa que sufre la recarga en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México al perderse Cobertura natural. El

aumento de uso urbano y agricultura en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México, reduce los valores de recarga potencial y puede afectar la calidad debido al uso de químicos en el sector agrícola y el manejo de aguas negras generadas en los usos urbanos.

Para futuras investigaciones es necesario la incorporación de la demanda de agua en la Ciudad de México, así como un modelo de agua subterránea con los resultados de este proyecto para mejorar el entendimiento de la dinámica oferta-demanda del agua.

### **13. Referencias**

Almeida-Leñero, L., Nava, M., Ramos, A., Espinosa, M., de Jesús Ordoñez, M. y Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta ecológica*, 84–85, 53–64.

- Amoozegar, A. (1992). Compact constant head permeameter: A convenient device for measuring hydraulic conductivity. *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice, advancesinmeasu*, 31–42.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. y Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- Arce, J L, Layer, P. W., Morales-Casique, E., Benowitz, J. A., Rangel, E. y Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34–49.
- Arce, José Luis, Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J. y Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320–332.
- Arnold, J G, Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B. y Neitsch, S. L. (2013). *SWAT 2012 input/output documentation*. Texas Water Resources Institute.
- Arnold, Jeffrey G, Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A. y Van Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O. y Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192.
- Birkle, P., Rodríguez, V. T. y Partida, E. G. (1998). The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6(4), 500–517.
- Caine, J. S., Evans, J. P. y Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028.
- Camacho, V. (2016). (PDF) *Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos*. Bio ciencias. <http://revistabiociencias.uan.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/19/17>
- Campos, A. D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México (Tesis de Licenciatura)*.

- Canteiro, M., Olea, S., Escolero, O. y Zambrano, L. (2019). Relationships between urban aquifers and preserved areas south of Mexico City. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 373–380.
- Comisión Europea. Dirección General de Agricultura. (2003). La agricultura y el medio ambiente. En *Fact sheets*.
- CONABIO. (2017). *Mapa nacional de referencia, cobertura de suelo 2017, 1:20000*.  
[https://monitoreo.conabio.gob.mx/snmb\\_charts/dashboard\\_mapabase.html](https://monitoreo.conabio.gob.mx/snmb_charts/dashboard_mapabase.html)
- CONAGUA. (2020). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*.  
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Costanza, R. (2008). Ecosystem services: multiple classification systems are needed. *Biol Conservat*, 141, 350–352.
- Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I. y Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones geográficas*, 66, 81–104.
- Custodio, E. (2007). Groundwater in volcanic hard rocks. En *Groundwater in fractured rocks* (pp. 111–124). CRC Press.
- Daily, G. C. (1997). *Nature's services* (Vol. 19971). Island Press, Washington, DC.
- Davidoff, B. y Selim, H. M. (1986). Goodness of Fit for eight water infiltration models 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 759–764.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A. y Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), 393–408.
- Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano-Santa Cruz, R., Macías-González, H. L., Mendoza-Rosales, C. y Silva-Romo, G. (1998). Geology of Xitle volcano in southern Mexico City, a 2000-year old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15(2), 115–131.
- Durazo, J. y Farvolden, R. N. (1989). The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *Journal of Hydrology*, 112(1–2), 171–190.

- Echenique, M. (2006). El crecimiento y el desarrollo de las ciudades. *Santiago, ¿ Dónde estamos y hacia dónde vamos*, 74–96.
- Escolero Fuentes, Ó. A. (2018). *Sistemas regionales de flujo de agua subterránea en México*.
- Escolero, Ó., Martínez, S., Kralisch, S., Perevochtchikova, M. y Delgado-Campo, J. (2009). Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. *Centro virtual del Cambio Climático*. [www.cvvccmatmosfera.unam.mx/sis\\_admin/.../agua\\_escolero\\_\\_inffinal\\_org.pdf](http://www.cvvccmatmosfera.unam.mx/sis_admin/.../agua_escolero__inffinal_org.pdf). [Consulta: 7 de julio del 2016].
- FAO, I. y ISRIC, I. (2012). JRC: Harmonized World Soil Database (version 1.2). *FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria*.
- Fisher, B., Turner, R. K. y Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, 68(3), 643–653.
- Florez Peñaloza, J. R. (2019). *Análisis del Comportamiento Histórico de la Red de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca de México (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). Groundwater prentice-hall. *Englewood Cliffs, NJ*, 176, 161–177.
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R. y Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158–178.
- GDF. (2010). Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal. *Recuperado el*, 29.
- GDF. (2012). Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. *Secretaría de Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, México, DF*.
- GRUPO DE INGENIERÍA EN CONSULTORÍA Y OBRAS, S. A. D. C. V. (2018). *Estudio de evaluación y aprovechamiento del sistema de manantiales de la Ciudad de México*.
- Holzbecher, E. y Sorek, S. (2006). Numerical models of groundwater flow and transport. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- INEGI. (2019a). *Cartas Edafológicas*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI. (2019b). *Geología-INEGI*. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>

- INEGI. (2019c). *Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno*. <https://www.inegi.gob.mx/app/mapas/>
- Jorquera, E., Weber, J. F. y Reyna, S. M. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. As.
- Kresic, N. y Stevanovic, Z. (2009). *Groundwater hydrology of springs: Engineering, theory, management and sustainability*. Butterworth-heinemann.
- Kumar, D., Sarthi, P. P. y Ranjan, P. (2016). Rainfall-runoff modeling using computational intelligence techniques. *2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 800–806.
- Libreros-Muñoz, H. (2004). La desigualdad espacial del consumo doméstico de agua en el Distrito Federal, México. Reflexiones a partir de un análisis estadístico factorial. *Documentos de trabajo. Serie Jóvenes Investigadores. Población, Territorio y Consumo de Agua. México: FLACSO*, 45–70.
- Maidment, D. R. y Morehouse, S. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI, Inc.
- MEA. (2003). Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being - A Framework for Assessment. En *Millennium Ecosystem Assessment*. Island press.
- MEA. (2005). Ecosystems and human well-being. En *Synthesis*. Island Press Washington, DC.
- Meinzer, O. E. (1927). *Large springs in the United States*. US Government Printing Office.
- Montico, A., Zapperi, P. A., Zilio, M. I. y Gil, V. (2019). Identificación de servicios ecosistémicos urbanos en la ciudad de Bahía Blanca y su aplicación al análisis de la seguridad hídrica. *Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal*, 7(1), 56–78.
- Nathan, A. J. y Scobell, A. (2012). How China sees America. En *Foreign Affairs* (Vol. 91, Número 5, pp. 1–146). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R. y Dubourg, V. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825–2830.
- Peña Ramirez, V. M. (2013). *Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal. (Tesis de Doctorado)*.

Universidad Nacional Autónoma de México.

- Peñuela, L. (2007). *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México*. Tesis de Maestría en Geografía, México: UNAM.
- Perevochtchikova, M. y Torruco, V. M. (2014). Análisis comparativo de dos instrumentos de conservación ambiental aplicados en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. *Sociedad y Ambiente*, 3, 3–25.
- Perevochtchikova, M. y Vázquez, A. (2010). Los Servicios Ambientales Hidrológicos como instrumento alternativo para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en el Distrito Federal. *Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. El Colegio de México, México DF*.
- Perevochtchikova, M. y Vázquez Beltrán, A. (2010). *Impacto del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en suelo de conservación del DF, México*.
- Porta Casanellas, J., Reguerín, L. A. y Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente (Libro)*. (Número 631.4 P6/2003).
- R Core Team. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rodríguez-Vásquez, A. F., Aristizábal-Castillo, A. M. y Camacho-Tamayo, J. H. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. *Engenharia Agrícola*, 28(1), 64–75.
- Saavedra, Z., Revah, L. O. y Barrera, F. L. (2011). Identification of threatened areas of environmental value in the Conservation Area of Mexico City, and setting priorities for their protection. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 74, 19–34.
- San Miguel Villegas, R. T. (2010). *La expansión urbana en suelo de conservación en la delegación Tlahuac, DF. México*. México: FLACSO México.
- Saxton, K. E. y Rawls, W. J. (2009). *Soil water properties calculator (version 6.02)*.
- Seiler, K. P. y Gat, J. R. (2007). Groundwater Recharge From Run-Off. En *Infiltration And* (Vol. 55). Springer Science & Business Media.
- Serrano-Notivoli, R., de Luis, M. y Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environmental modelling & software*, 89, 190–195.

- Siebe, C. (2000). Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 104(1–4), 45–64.
- Suárez, M. y Delgado, J. (2007). La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020. *Estudios demográficos y urbanos*, 22(1), 101–142.
- Torres Benites, E., Mota, O., Luiconsejer, J., Reynoso, F., Saseso, D. y Mejía Sáenz, E. (2000). *Comparación de los modelos de simulación hidrológica SWRRB y SWAT en la Cuenca*. Colegio de Postgraduados, Campus Motecillo, Instituto de Recursos Naturales ....
- Turner, R. K., Georgiou, S. y Fisher, B. (2008). Valuing ecosystem services. *The case of multifunctional wetlands*. Earthscan, London.
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 1–47.
- Velázquez, K. G. M. (2015). *La cobertura y uso del suelo en la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales en la cuenca el tejocote, México, mediante el modelo hidrológico SWAT*. Universidad Autónoma del Estado De México.
- Walker, R. J., Holdsworth, R. E., Armitage, P. J. y Faulkner, D. R. (2013). Fault zone permeability structure evolution in basalts. *Geology*, 41(1), 59–62.
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological conservation*, 139(3–4), 235–246.
- Westman, W. E. (1977). How much are nature's services worth? *Science*, 197(4307), 960–964.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. y Arnold, J. (2007). ArcSWAT interface for SWAT 2005. *User's Guide*, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple.