



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERIA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL MANANTIAL SANTA FE

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SIRIA YAMILY GARCIA ALVARADO

TUTORES PRINCIPALES  
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
DRA. ADRIANA PALMA NAVA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:  
DR. ALEJANDRO MENDOZA RESÉNDIZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
DR. HUGO ENRIQUE JÚNEZ FERREIRA, UAZ  
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. NOVIEMBRE 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

A mis Padres:  
Florencio y Ma. De Jesús,  
Mis mayores ejemplos y motores de vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis tutores principales el Dr. Jesús Gracia y la Dr. Adriana Palma por su confianza, disposición, paciencia, asesoría y compartir su conocimiento conmigo. Sin duda, su apoyo fue indispensable para la culminación del proyecto de investigación.

A mis sinodales: la Dra. Maritza Arganis, el Dr. Alejandro Reséndiz y el Dr. Hugo Júnez, por los conocimientos impartidos en clase, así como sus aportaciones a este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para la realización de mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

A mi compañero M. en I. Ricardo López por su amistad y ayuda, las cuales fueron esenciales para sobrellevar los días pesados, durante y después de la maestría.

A María Fernanda, por sus lecciones de redacción que fueron de gran soporte para la redacción de este proyecto.

A mi amiga Ing. Nayaly Martínez, por apoyo y acompañamiento invariable en este proceso.

A mis amigas Abigail, Sara y Valeria, sus ánimos en todo momento me animaron a seguir creyendo en mí.

A mis padres, por su confianza y ser mi impulso para seguir creciendo.

A mis hermanas: Lucy, Blanca, Tania y Marcela, por su sostén y apoyo en cada etapa de mi vida, siempre serán inspiración para mí.

A mis sobrinos: Jacqui, Raúl, Meghan, Danna y Aranza, por las alegrías que me comparten y me dan ánimo para seguir adelante.

A mi abuelo Manuel, por estar siempre al pendiente de mí.

Al Ing. Eliezer López, por su acompañamiento desde el inicio hasta la culminación del proyecto, creer en mí y constantemente alentarme en todos los aspectos de mi vida.

A Dios, por ser mi fuerza y sustento en cualquier situación.

A las demás personas que estuvieron presentes de una u otra forma a lo largo de este proceso y, sobre todo, infundiéndome aliento.

A todos ustedes, GRACIAS por ser parte mi vida.

# CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL MANANTIAL SANTA FE

## RESUMEN

El presente trabajo expone la caracterización hidrogeológica del manantial Santa Fe, el cual ha contribuido a la sociedad con su caudal desde la época colonial y, actualmente, se aprovecha para consumo humano en la Ciudad de México. El propósito del estudio fue identificar las principales características del sistema que dan origen a las aguas subterráneas que afluyen al manantial e identificar zonas de aportación/influencia en la recarga de sus aguas con el fin de optimizar su protección y conservación.

La recolección de información se llevó a cabo mediante la obtención de datos importantes (disponibles y confiables) respecto al sitio de estudio y del manantial. Tales datos se complementaron con visitas de campo, para la identificación de características físicas del lugar, medición de parámetros fisicoquímicos in situ y recolección de muestras de agua para su análisis en laboratorio.

Como resultado, se identificó que el manantial yace en una barranca ubicada en los lomeríos de la Sierra de las Cruces en una zona de fallas geológicas, materiales heterogéneos fracturados no consolidados, donde el acuífero se considera “libre” y área importante de recarga. El agua del manantial se clasificó dentro del sistema de flujo local, tipo bicarbonatada magnésico-cálcica de origen meteórico y con un caudal promedio de 151 l/s. Debido a que este caudal se incorpora al sistema de agua potable de la Ciudad de México se calculó un Índice de Calidad para las aguas del manantial mediante los parámetros fisicoquímicos recolectados y se clasificó como agua de excelente calidad. De la misma manera, mediante los valores de los isótopos estables hidrógeno (Deuterio) y del oxígeno (Oxígeno-18), se estimaron alturas de recarga a más de 3000 m.s.n.m (Sierra de las Cruces).

Por consiguiente, se integraron los datos relevantes en un modelo hidrogeológico conceptual a escala “regional”, a causa de que las aguas del manantial presentan un recorrido extenso dentro del sistema de flujo local. Las características obtenidas e interpretadas permitieron clasificarlo como un manantial de tipo “colgado” y seleccionar el método adecuado para la definición de zonas de aportación (captura) e influencia como zonas de protección para manantial (SPZ).

Consecuentemente, se seleccionó el método topográfico para delimitación y se adaptó a la información que se obtuvo del manantial Santa Fe. La delimitación propuesta para el manantial consiste en cuatro zonas; SPZ1 se definió por medio de una subcuenca local dentro de la barranca, SPZ2 se delineó con base en la estimación de la zona de recarga anual, SPZ3 se consideró el resto de la zona potencial de captación y SIPZ como el área de influencia directa de la descarga y que incluye SPZ1. Finalmente, se plantearon medidas de protección y restricción de actividades respecto a las zonas delimitadas.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>1</b>
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	2
1.2.1	General.....	2
1.2.2	Específicos .....	2
1.3	ALCANCES .....	3
1.4	SÍNTESIS DEL TRABAJO.....	3
<b>2</b>	<b>HISTORIA DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO A TRAVÉS DE SUS MANANTIALES</b> .....	<b>4</b>
2.1.	ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	4
2.2.	HISTORIA DEL APROVECHAMIENTO DE LOS MANANTIALES.....	5
2.3.	HISTORIA DEL APROVECHAMIENTO DEL MANANTIAL SANTA FE .....	9
2.4.	IMPORTANCIA DE SU CONSERVACIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	15
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>18</b>
3.1.	LOCALIZACIÓN .....	18
3.2.	CLIMA .....	19
3.2.1	Temperatura .....	20
3.2.2	Precipitación .....	21
3.3	FISIOGRAFÍA.....	22
3.4.	HIDROLOGÍA.....	23
3.5.	TRABAJO DE CAMPO .....	25
3.5.1	Infraestructura .....	26
3.5.2	Muestreo y Aforo .....	30
<b>4</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL DEL MANANTIAL</b> .....	<b>34</b>
4.1.	GEOLOGÍA.....	34
4.2.	HIDROESTRATIGRAFÍA .....	37
4.3.	HIDROGEOQUÍMICA.....	39
4.1.1	Iones Mayoritarios .....	40
4.1.2	Isotopía .....	44
4.4.	CALIDAD .....	46
4.5.	GASTOS HISTÓRICOS APROVECHADOS .....	49
4.6.	PIEZOMETRÍA .....	53
4.7.	PERFILES .....	58
4.1.3	Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	62
<b>5</b>	<b>ZONA DE INFLUENCIA Y APORTACIÓN DEL MANANTIAL</b> .....	<b>66</b>
5.1	METODOLOGÍA DE DELINEACIÓN DE SPZS PARA EL MANANTIAL SANTA FE .....	67
5.2	SPZS PROPUESTAS PARA EL MANANTIAL SANTA FE.....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>84</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> RECONSTRUCCIÓN PICTÓRICA DE TENOCHTITLÁN (MUSEO DE LA CIUDAD DE MÉXICO).....	5
<b>FIGURA 2</b> ACUEDUCTO CHAPULTEPEC.....	7
<b>FIGURA 3</b> MODIFICADO DEL PLANO TOPOGRÁFICO DE LOS ACUEDUCTOS DE SANTA FE Y DESIERTO DE LOS LEONES. MAPOTECA OROZCO Y BERRA. (1833). COLECCIÓN O Y B 417-20 .....	11
<b>FIGURA 4</b> LÍNEA DEL TIEMPO DEL APROVECHAMIENTO MANANTIAL SANTA FE .....	14
<b>FIGURA 5</b> MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO .....	18
<b>FIGURA 6</b> ZONA DE ESTUDIO (PREDIO DE CAPTACIÓN).....	19
<b>FIGURA 7</b> TIPOS DE CLIMAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO.....	20
<b>FIGURA 8</b> PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (MM) DE LA CIUDAD DE MÉXICO 1993-2017.....	22
<b>FIGURA 9</b> FISIOGRAFÍA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. ....	23
<b>FIGURA 10</b> HIDROLOGÍA DE LA ZONA DEL MANANTIAL.....	25
<b>FIGURA 11</b> EXTERIOR DEL CÁRCAMO DE BOMBEO.....	26
<b>FIGURA 12</b> INTERIOR DEL CÁRCAMO DE BOMBEO .....	27
<b>FIGURA 13</b> CAJAS DE CAPTACIÓN .....	28
<b>FIGURA 14.</b> VEGETACIÓN DENTRO DEL PREDIO.....	29
<b>FIGURA 15.</b> SITIOS DE MUESTREO Y AFORO.....	30
<b>FIGURA 16.</b> MEDICIÓN DE PARÁMETROS IN SITU .....	31
<b>FIGURA 17.</b> MEDICIÓN IN SITU A HUMEDAL Y SITIO DE AFORO.....	32
<b>FIGURA 18.</b> SITIO DE AFORO .....	32
<b>FIGURA 19</b> GEOLOGÍA REGIONAL .....	34
<b>FIGURA 20</b> PERFIL GEOLÓGICO REGIONAL .....	35
<b>FIGURA 21</b> CORTE LITOLÓGICO DEL POZO LOMAS DE CHAPULTEPEC No. 2. SACMEX (1994) .....	36
<b>FIGURA 22</b> PERFIL HIDROGEOLÓGICO REGIONAL .....	38
<b>FIGURA 23.</b> DIAGRAMA DE PIPER.....	41
<b>FIGURA 24.</b> DIAGRAMA DE MIFFLIN .....	42
<b>FIGURA 25.</b> DIAGRAMA DE GIBBS .....	43
<b>FIGURA 26.</b> GRÁFICA DE COMPORTAMIENTO ISOTÓPICO MANANTIAL SANTA FE.....	45
<b>FIGURA 27.</b> COMPORTAMIENTO DEL GASTO PROMEDIO MENSUAL DEL MANANTIAL SANTA FE DE 1987-2018 (INCLUYE AÑOS NO COMPLETOS).....	50
<b>FIGURA 28.</b> GRÁFICA DEL GASTO PROMEDIO ANUAL DEL MANANTIAL SANTA FE PARA EL PERIODO DE 1987-2018.....	50
<b>FIGURA 29.</b> GASTO PROMEDIO MENSUAL DEL MANANTIAL SANTA FE PARA 1987-2018.....	51
<b>FIGURA 30.</b> GASTO PROMEDIO MENSUAL DEL MANANTIAL SANTA FE PARA LOS AÑOS 1987, 1998, 2009 Y 2020.....	52
<b>FIGURA 31</b> DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PIEZÓMETROS.....	55
<b>FIGURA 32</b> DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL MANANTIAL.....	56
<b>FIGURA 33</b> FLUJO REGIONAL.....	57
<b>FIGURA 34</b> UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PROPUESTAS PARA EL SITIO DE ESTUDIO .....	60
<b>FIGURA 35.</b> MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	63
<b>FIGURA 36.</b> MODELO HIDROGEOLÓGICO LOCAL .....	65
<b>FIGURA 37.</b> TIPOS DE MANANTIALES DE ACUERDO CON SUS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS (MODIFICADO DE BAKER AND FOULK, 1975).....	68
<b>FIGURA 38.</b> GUÍA PARA DETERMINAR EL MÉTODO DE DELINEACIÓN APROPIADO PARA DIFERENTES MEDIOS GEOLÓGICOS Y TIPOS DE FLUJO (MODIFICADO DE KREYE ET AL., 1996) .....	69
<b>FIGURA 39.</b> SPZS PARA EL MANANTIAL SANTA FE (MODIFICADO DE KRESIC & STEVANOVIC, 2010).....	71
<b>FIGURA 40.</b> PASOS PARA LA DELIMITACIÓN DE SPZS PARA EL MANANTIAL SANTA FE (MODIFICADO DE VALLE ET AL., 2021) .....	74
<b>FIGURA 41.</b> SPZ3 (PCZ/ZONA DE CAPTURA POTENCIAL) Y SPZ2 (RZ/ZONA DE RECARGA) PARA EL MANANTIAL SANTA FE .....	76

<b>FIGURA 42.</b> SPZ1 Y SIPZ PARA EL MANANTIAL SANTA FE (IMAGEN SATELITAL DE USGS DE NOVIEMBRE DEL 2022) .....	77
<b>FIGURA 43.</b> MODELO 3D PARA LAS SPZs DEL MANANTIAL SANTA FE .....	78

## **INDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1</b> ALTURA PROBABLE DE RECARGA. *DATOS DE CORTÉS ET AL., (1989). .....	46
<b>TABLA 2</b> . CLASIFICACIÓN PARA IWQ. ....	48
<b>TABLA 3</b> OBSERVACIONES PIEZOMÉTRICAS EN EL PREDIO DEL MANANTIAL 2018.....	54
<b>TABLA 4.</b> CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES CON BASE A SU DESCARGA PROMEDIO (MEINZER, 1923) .....	68
<b>TABLA 5.</b> VALORES ANUALES PARA EL BALANCE HÍDRICO Y SPZ2 PARA EL MANANTIAL SANTA FE .....	73
<b>TABLA 6.</b> RESTRICCIONES CONFORME A NIVELES DE VULNERABILIDAD Y ZONAS DE PROTECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (MODIFICADO CON INFORMACIÓN DE SAEFL 2000). .....	80

## 1 ANTECEDENTES

### 1.1. Introducción

La demanda del agua potable, un elemento primordial para la vida humana se ha incrementado a causa del crecimiento poblacional y las urbes en los últimos años, y en general de todas las actividades humanas. Dado que la disponibilidad de dicha agua depende de los aprovechamientos existentes, la ausencia, agotamiento y contaminación de los provenientes de las aguas superficiales, desde hace varios siglos ha orillado al ser humano a auxiliarse en el agua subterránea para suplementar sus necesidades.

Es así como del agua subterránea dependen las áreas tanto urbanas como rurales, ya que participa en todos los niveles de la economía, hábitats y ecosistemas que éstas tienen. De tal manera, que es susceptible al crecimiento de la población, el cambio climático y las actividades antropogénicas (Margat & Gun, 2013). Independientemente de la zona de explotación del agua, sin las medidas necesarias para su preservación en el ciclo hidrológico y en el ecosistema al que pertenece, se fomenta su escasez o inutilidad.

Respecto a lo anterior, las fuentes de este recurso en la Ciudad de México no se encuentran exentas de esta situación. La capital, desde la época precolonial ha sido partícipe del aprovechamiento de manantiales para el suministro de agua potable. Debido a la desmedida extracción de su acuífero, carencia de información y medidas de preservación, en conjunto con otros factores, varias fuentes de agua subterránea, se encuentran expuestas al abatimiento y/o contaminación, resultado que se puede diagnosticar para definir un plan de control con ayuda de su estudio.

Ahora bien, esta agua se encuentra en una parte poco accesible del ciclo hidrológico que restringe su visibilidad y limita la atención académica, por lo que su estudio se considera reducido, pero es indispensable para desarrollar herramientas de conservación para las fuentes, como los manantiales, que la proporcionan prácticamente sin costo.

Para comprender el origen de los manantiales, como fuente de agua subterránea, es imprescindible estudiar el medio en el que se desarrollan. Dicha investigación da como resultado el conocimiento de sus características, que no solo permite entender el sistema en el que interactúa, sino que también facilita la capacidad de aplicar medidas para su preservación y optimización; en términos generales de cantidad y

calidad, sobre todo en aquellas fuentes de abastecimiento que encuentran vulnerables a las actividades antropogénicas.

Debido a que algunos manantiales que suministran agua potable a la Ciudad de México se localizan en zonas de conservación, es posible reducir su exposición a la contaminación y proteger su recarga. A diferencia de otras fuentes que carecen de esta virtud, como es el caso del manantial en estudio, desventaja que podría deteriorar su aportación y pureza.

No obstante, existen diversos métodos mediante los cuales se pueden definir áreas de protección para aprovechamientos de agua potable, que también es posible aplicar en manantiales, con el objeto de preservar la calidad y aportación del caudal que se utiliza para consumo humano. Estas áreas se determinan dentro del área de captación, en la cual se limitan o prohíben actividades propensas a contaminar las aguas subterráneas. Lo anterior se logra por medio de la obtención de datos y herramientas respecto a las características hidrogeológicas del aprovechamiento y su entorno. El área se delimita según sea el objetivo, calidad y cantidad que los datos sobre el sitio de estudio lo permitan.

La delimitación de estas zonas en fuentes de agua subterránea, no sólo disminuye el riesgo de contaminación por agentes externos, sino también ayuda a mitigar los efectos en sus ecosistemas y, en mayor medida, en aquellos aprovechamientos que no se sitúan en zonas protegidas.

## **1.2. Objetivos**

### 1.2.1 General

Integrar la información disponible para definir el marco hidrogeológico del manantial Santa Fe e identificar adecuadamente zonas de aportación/influencia que contribuyan a su conservación.

### 1.2.2 Específicos

- Realizar una caracterización hidrogeológica del manantial.
- Describir el funcionamiento del sistema hidrogeológico al que pertenece.

- Evaluar el comportamiento del caudal respecto a las temporadas de estiaje y precipitación.
- Identificar zonas de potencial aportación/influencia.

### **1.3 Alcances**

Este proyecto pretende definir el modelo hidrogeológico del manantial Santa Fe mediante datos obtenidos en campo, incluyendo su caracterización hidrogeoquímica e isotópica para explicar el origen y funcionamiento del afluente. De igual forma se busca evaluar la evolución del caudal aportado por el mismo.

Se espera que el mejor entendimiento de los diversos procesos hidrogeoquímicos que suceden durante la recarga, tránsito y descarga de agua en la zona donde coexisten diversos manantiales permitirá llevar a cabo un adecuado aprovechamiento y protección de los mismos.

### **1.4 Síntesis del trabajo**

El conocimiento de los sistemas hidrogeológicos en los que se desarrollan las aguas subterráneas que, en su mayoría, proveen de agua potable a los asentamientos humanos, es la base de su protección y conservación. Estos últimos son esenciales debido a la alta demanda del recurso hídrico, sin embargo, se limitan al depender de la calidad y cantidad de la información que se disponga de las fuentes de agua subterránea. Esta investigación presenta la caracterización hidrogeológica del manantial Santa Fe, cuyas aguas subterráneas han proporcionado el recurso de agua potable al servicio de la Ciudad de México. Mediante la información recopilada y disponible de las características hidrogeológicas principales del manantial, se pretende interpretar su origen y funcionamiento. Lo anterior, se utiliza como base para emplear el método adecuado para delimitar zonas de protección para el manantial tomando en cuenta dichas características y, permita simplificar el desarrollo de la metodología con información confiable. Por ende, conforme al funcionamiento del sistema hidrogeológico del manantial, se delimitaron cuatro áreas de protección para esclarecer el origen de su recarga y la vulnerabilidad que presenta ante contaminantes al localizarse dentro de suelo urbano. De modo que, por medio de estas zonas de protección, se pueden aplicar medidas de protección apropiadas para su conservación y de esta manera contribuir para un aprovechamiento sustentable de las aguas del manantial Santa Fe.

## **2 HISTORIA DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO A TRAVÉS DE SUS MANANTIALES**

### **2.1. Abastecimiento de Agua de la Ciudad de México**

Para abastecer de agua potable a una gran población no sólo se requiere tener cierto volumen disponible, sino también la certeza de que se trata de agua dulce apta para consumo humano. Este elemento ha tenido una importante presencia desde la aparición de los primeros grupos de individuos en el Valle de México, pues al encontrarse en forma de manantiales, en las corrientes superficiales, se convirtió en una de las fuentes primigenias de su desarrollo, ya que ninguna civilización puede progresar sin llevar a cabo sus funciones urbanas por medio del agua potable.

Como cualquier ciudad, la de México necesita proveer a sus pobladores del líquido vital y es preciso tener los recursos para hacerlo. Sin embargo, históricamente, ha tenido inconvenientes para cubrir la demanda de agua con las fuentes superficiales disponibles en su entorno cercano, de modo que hoy en día gran parte de su sustento proviene de cuencas externas como el Lerma y el Cutzamala, así como de sus acuíferos.

No obstante, es importante rescatar que los manantiales aún representan una parte sustancial en el total del agua que fluye por la zona metropolitana y que se acumula en sus distintas áreas de captación, expandidas por tres principales cuencas hidrológicas: Cuenca del Valle de México, Cuenca Alto Lerma y Cuenca del Río Cutzamala. De dichas cuencas, se desprenden aguas superficiales y subterráneas, cuyo control está a cargo actualmente del Sistema de Agua Potable de la Ciudad México (SACMEX), organismo que además se encarga de su infraestructura, conformada por líneas de conducción, pozos, presas, plantas de bombeo, etc.

Además de ser el instituto operador que abastece de agua a la Ciudad de México, también es en parte responsable del Sistema Lerma ya que proporciona agua a zonas del Estado de México dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y su subcuenca, con 450 pozos dentro de la capital, 395 pozos en el Sistema Lerma, 39 en el Sistema Chiconautla y fuentes superficiales, en las que se encuentran 69 manantiales (SACMEX, 2018). De estos últimos se dependió fuertemente durante determinados periodos de tiempo, de tal manera que algunos se agotaron y comenzó a popularizarse la extracción de agua por pozos, lo que ha generado un importante cambio en el almacenamiento del acuífero (Lesser y Asociados, 2005)

La zona poniente del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, incluye importantes áreas de recarga del mismo, allí se han aprovechado una relevante cantidad de manantiales desde la época precolonial. La Sierra de Las Cruces y el Ajusco, son áreas reconocidas por su aportación a la recarga del acuífero y poseer niveles freáticos significativos (CONAGUA, 2018a; Lesser y Asociados, 2005). Adicionalmente, los manantiales aprovechados, para el año 2016 contribuían al suministro de agua dulce para la Ciudad de México con un 3% del total (SACMEX, 2018), porcentaje considerable, tomando en cuenta que su aprovechamiento data del siglo XVI.

## 2.2. Historia del Aprovechamiento de los Manantiales

El aprovechamiento del recurso hídrico en la ZMVM se remonta desde la época precolonial, donde los primeros habitantes crearon su asentamiento por medio de un islote que con el pasar de los años fue ganando terreno, por medio de chinampas que utilizaban para realizar sus cultivos. El lago donde se asentó la gran Tenochtitlán, ubicado en el valle de la cuenca, era alimentado por ríos, arroyos y manantiales, formando depósitos lacustres (Figura 1). Además, la evaporación y transpiración que se generaba en la cuenca, permitieron que las sales acumuladas en el agua del lago y en las arcillas (Durazo, 1996), dejara el agua en calidad de no consumible.



**Figura 1** Reconstrucción pictórica de Tenochtitlán (Museo de la Ciudad de México)

La única fuente de agua potable disponible para los habitantes en la zona eran los manantiales que se encontraban al poniente de la zona lacustre. Lo que dio lugar a una constante ocupación desde el Preclásico hasta la actualidad, algunos de estos manantiales continúan dando servicio a la Ciudad de México hasta nuestros días.

Este territorio fue ocupado por gente asociada a los matlatzincas y consecuentemente por los tepantecas, en 1428 el tlatoani Izcóatl lo conquistó para el pueblo mexica y antes de 1440 mandó construir un acueducto a ras de tierra que condujera agua hasta Tenochtitlan. Años después fue reconstruido con cañería alta por Nezahualcóyotl, en el periodo de Moctezuma.

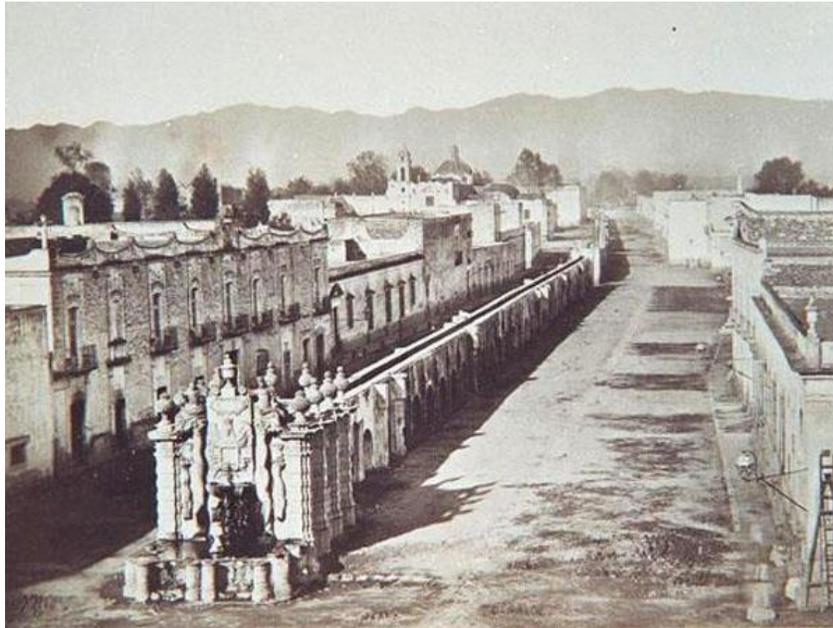
Tenochtitlán, desde su fundación, tuvo el desafío de proveer agua potable para sus habitantes. Aunque en un principio el líquido se sustentó por medio de un manantial ubicado dentro del mismo islote, su crecimiento aumentó proporcionalmente la demanda del líquido. Por lo anterior, los mexicas obtuvieron concesión para conducir el agua desde Chapultepec, dada por Tezozómoc durante el mandato de Chimalpopoca y así poder conducirla por medio de un acueducto (IMTA, 1989) . Sin embargo, debido a una inundación en 1449, el acueducto quedó bajo el agua, por lo que se tuvo que reconstruir entre 1454 y 1466 bajo la dirección de Nezahualcóyotl. Esta obra proporcionó agua durante los mandatos de Axayácatl y Tizoc (Lombardo, 1972).

En el reinado de Ahuízotl (1487-1502), se decretó la construcción de un acueducto para transportar el líquido de los manantiales de Coyoacán y Churubusco, pero debido a su gran caudal, provocó inundaciones causándole daños a la estructura, así que en 1507 Moctezuma lo mandó restablecer (Lombardo, 1972); se cree que la obra desapareció antes de la llegada de los españoles.

A la llegada de los españoles a la zona, el acueducto de Chapultepec, el cual describe Cortés, proporcionaba agua dulce a toda la ciudad y fue destruido parcialmente, pero al consumarse la conquista comenzó su reconstrucción (H. Cortés, 1975). Al ser insuficientes las aguas del Chapultepec para suplir la demanda, en el virreinato de Luis Velasco (1550-1564), se propuso construir un segundo acueducto que proveería agua desde Santa Fe. Años después, con el aumento de la población, se complementó la cantidad del líquido, captando los manantiales del Desierto de los Leones, mismos que también eran de buena calidad.

El caudal de ambos manantiales (que fluían por el acueducto de San Cosme) se destinó para la parte centro y norte de la ciudad, mientras que el de Chapultepec estaba dirigido a solventar a la población de la parte sur. A finales del siglo XVI se

edificó un nuevo acueducto, cuyos restos se pueden observar en la actual avenida de Chapultepec (Figura 2), obra realizada y costeada por una comisión de indios (Orozco, 1980), que tenía como fin distribuir agua a los barrios San Juan y San Pablo.



**Figura 2** Acueducto Chapultepec  
Fuente: [www.mxtravelguide.com](http://www.mxtravelguide.com)

Las tres anteriores obras, conformaron el sistema que proporcionó agua a la ciudad desde el virreinato hasta finales del siglo XIX. Además, a mediados de este siglo ya existían pozos privados que complementaban la distribución. Por otra parte, al final de este periodo se adhirieron las aguas del río Hondo (Bernárdez de la Granja, 2012), debido a que el manantial de Chapultepec sufrió una disminución en su caudal que concluyó en su agotamiento y condujo a la demolición del acueducto. La demanda había cambiado a causa de que los usos agrícola e industrial iban en aumento. Aunque ya existía un claro descenso en el caudal de algunas fuentes, se tenía una aportación promedio de 1,314.0 l/s de agua de los manantiales antes de las nuevas obras del porfiriato (Romero, 1999). De acuerdo con Lesser y Asociados (2005) antes de que el acuífero de la Ciudad de México fuera sobreexplotado (a principios del siglo XX), este acuífero se encontraba saturado. Sin embargo, debido a que podía recibir grandes proporciones de agua, no tenía un drenaje y los excedentes del acuífero se vertían a través de manantiales.

A comienzos del siglo XX, la calidad del agua potable iba en declive debido a la falta de higiene en las cisternas, fuentes y pozos privados. Ríos, canales y arroyos que

aportan su caudal presentaban contaminación por escurrimientos de lluvia con lodos, materia orgánica, sumando también las descargas industriales.

Por tal situación, Rivera (1917) menciona que en 1900 el Ayuntamiento de la Ciudad de México mandó realizar estudios a los manantiales circundantes, a petición del Ing. Gilberto Montiel, Regidor de Aguas, con la intención de proveer agua potable suficiente, de buena calidad, con mejores estructuras de distribución y con la capacidad de llegar a los pisos altos de las casas. Además, en 1898 la Comisión Hidrográfica del Valle de México realizó un estudio geológico de los manantiales del sur, donde se reconocía a los que se encontraban en las partes altas como a los de menor elevación. Dicho estudio sustentó la selección de la región comprendida por los lagos de Chalco y Xochimilco como la más adecuada para dotar la demanda, ya que contenía manantiales que cumplían la necesidad de un caudal constante para las nuevas obras que conformarían el sistema de distribución de agua potable (Rivera, 1914).

En el año de 1902, se aceptó el proyecto para el aprovechamiento de los manantiales de Xochimilco, propuesto y dirigido por el Ing. Manuel Marroquín y Rivera junto a un equipo de ingenieros franco-mexicanos. Entre 1903 y 1905 se realizaron pruebas, trazos y obras preliminares. A mediados de 1905 comenzaron formalmente las obras para el acueducto principal, las mismas que concluyeron tres años después. Los depósitos del Molino del Rey se terminaron en 1909, las plantas de captación y planta de bombas en 1910. Desde 1908 se proporcionó agua de los manantiales de La Noria (Xochimilco) a la ciudad, mejorando su calidad, debido a que no fue necesario introducir las aguas del río Hondo que durante los estudios se clasificaron como impuras (Rivera, 1914). Por otra parte, en ese mismo año se destinaron las aguas del acueducto Santa Fe sólo para el pueblo del mismo nombre y Cuajimalpa.

Para el año de 1930, el acueducto que transportaba las aguas de Xochimilco comenzó a fallar y disminuyó su caudal (Aréchiga Ernesto, 2004). Debido a las reparaciones sobrevivió hasta 1940, cuando se aumentó la capacidad de extracción con la instalación de bombas de Xotepingo. Pese a ello, a partir de mediados del siglo, comenzaron a agotarse los manantiales y los canales.

El año de 1940, la demanda de agua para la Ciudad de México ya era abastecida mediante la perforación de pozos, y en 1942 se iniciaron las obras para conducir el agua desde los pozos de la cuenca del Lerma a través de un acueducto sobre la sierra de Las Cruces, a más de 3,000 metros sobre el nivel del mar (Legorreta, 2006). Pero la complejidad de las obras retrasó el inicio de su operación y en 1948 se aumentó de manera importante la perforación de pozos con el consiguiente hundimiento del terreno. Esta práctica se fue incrementando en número hacia las

décadas de los 50's y 60's. De igual manera, el aumento de la población acrecentó la urbanización, que orilló a importar mayor cantidad de agua proveniente de otras cuencas. Lo anterior desembocó en el abatimiento del nivel del agua subterránea y, con ello, la desaparición de algunos manantiales.

En la década de los setenta, el sistema Lerma llegó a abastecer a la ciudad con un gran caudal, lo que provocó efectos negativos a su cuenca, de ahí que se buscasen fuentes alternativas de abastecimiento. Se determinó entonces que la cuenca del río Cutzamala, en el Estado de México, era la idónea por la calidad y cantidad de agua con la que contaba, a pesar de que se localiza a 126 km de la Ciudad de México, y que era (y sigue siendo) necesario bombearla más de 1,200 m, debido a la diferencia de altura con la cuenca de México. El sistema Cutzamala empezó a funcionar en 1982 y para el año 2001 proporcionaba cerca de una cuarta parte del abastecimiento total de agua a la ciudad (Izazola, 2001) .

En la actualidad, las salidas del agua del acuífero y la explotación de los manantiales activos sigue siendo a través de la extracción por medio de pozos con la misma intención de suministro. Sin embargo, por el aumento de la demanda de agua y de las extracciones a través del bombeo, el nivel del acuífero se fue reduciendo (Lesser y Asociados, 1990). Desde mediados de siglo XX fue claramente notable la explotación debido a que el nivel piezométrico original que se encontraba cercano a la superficie y en varios sitios daba origen a manantiales, con el abatimiento del nivel de agua subterránea se provocó la desaparición de varios de ellos (Lesser y Asociados, 2005). Aún en estas condiciones, existen manantiales que han contribuido con su caudal de manera permanente para uso de la población, desde hace más de cuatro siglos, como es el caso del manantial Santa Fe.

### **2.3. Historia del Aprovechamiento del Manantial Santa Fe**

El aprovechamiento del manantial Santa Fe data del siglo XVI, ante la necesidad de un mayor caudal y calidad de agua para los moradores de la capital, por lo que ha sido de vital importancia para el desarrollo de la Ciudad de México, que desde su fundación mantuvo disputas con el pueblo Santa Fe debido a que el agua se utilizaba para riego y sus habitantes (Covarrubias, 2015).

El afluente en cuestión, tiene su origen en lo que antes era el pueblo de Santa Fe, este último tuvo su fundación a raíz de varios proyectos con fines humanitarios para la población indígena durante los inicios del virreinato por iniciativa de Vasco de Quiroga quien, a principios de 1532 compró con sus propios recursos los terrenos ubicados en las lomas de Acatxóchitl (dentro de las laderas del Eje Volcánico

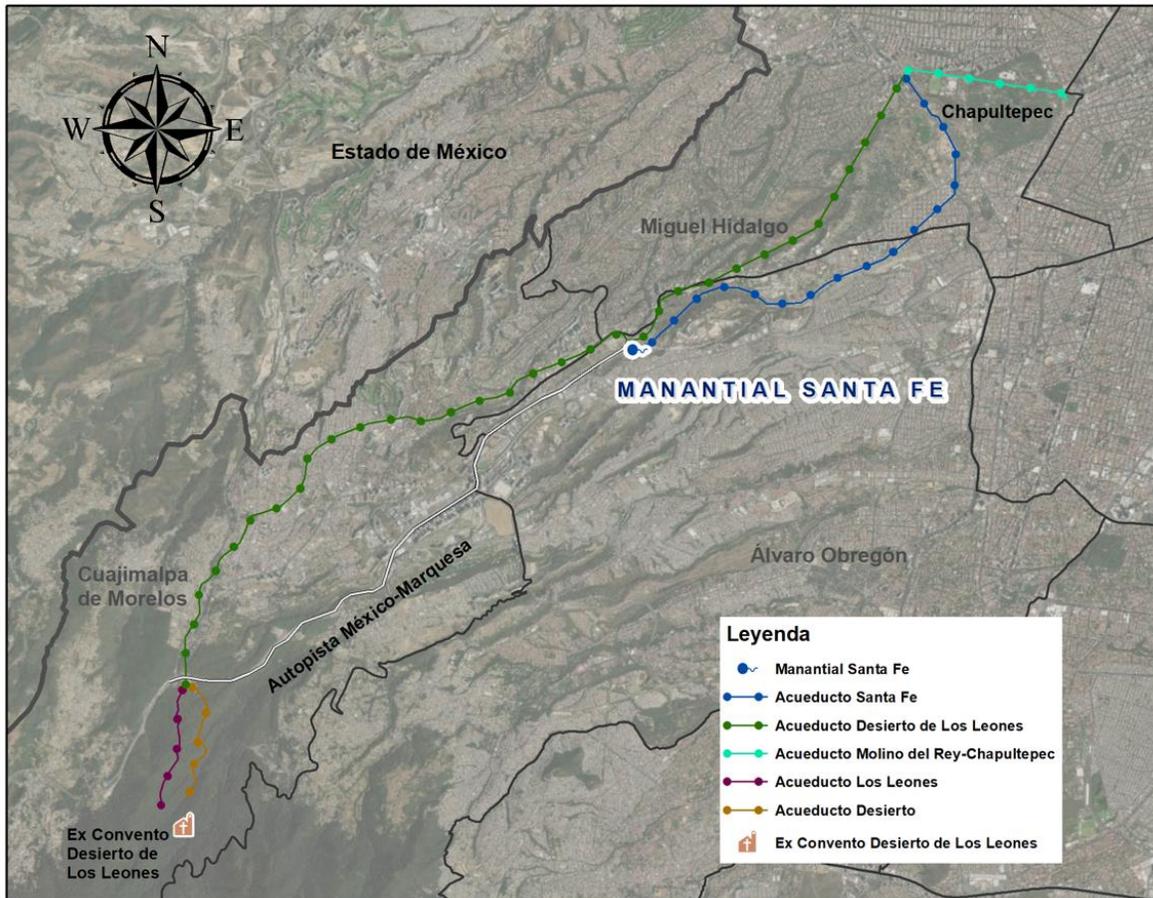
Transversal) al poniente de la región lacustre de la Cuenca de México (Covarrubias, 2015).

El afloramiento de Santa Fe está localizado, como ya se había mencionado antes, en la parte montañosa del poniente de la Ciudad de México, con una diferencia de altura de 166.18 m con respecto a esta última, lo que proporcionaba una adecuada presión para su llegada a la ciudad y a una distancia de 9,716.0 m, de acuerdo con los trabajos del Ing. Salazar Ilaguerri en 1860. El paisaje es descrito en medio de una arboleda que contaba con diez vertientes grandes y otras de menor tamaño que en conjunto formaban un derrame de 2.00 m de ancho y 0.10 m de profundidad (Peñafiel, 1884).

En las primeras décadas del virreinato, debido a que el agua de Chapultepec comenzaba a ser insuficiente y de mala calidad para la población, para 1557, el virrey Luis de Velasco (1550-1564) y el Ayuntamiento con la propuesta de una mejor fuente, comenzaron las negociaciones para la adquisición de los manantiales y el bosque del pueblo de Santa Fe, los cuales habían sido concedidos al obispado de Michoacán e imposibilitaba disponer de los anteriores (Orozco, 1864). Debido a que la resolución fue tardía, el Ayuntamiento propuso otras alternativas, como traer las aguas de la fuente de Coyoacán o Churubusco; sin embargo, se encontraron con la inviabilidad de no poder conducir el caudal o no tener la capacidad de cumplir con la demanda de la ciudad (Bernárdez de la Granja, 2016; IMTA, 1989)

La zona fue adquirida en los últimos meses de 1563 y la arquería se empezó a construir en 1564 (Pineda, 1995) . Los trabajos se suspendieron durante siete años, a consecuencia de que persistían diferencias entre las autoridades ante la propuesta de conducir las aguas del manantial de Churubusco, que se había obstruido después de la gran inundación de 1502. No obstante, la obra no fue concluida y finalmente se eligieron a las aguas de Santa Fe como la mejor opción (IMTA, 1989; Peñafiel, 1884).

Entonces, el virrey Martín Enríquez proyectó el aprovechamiento del manantial por medio de la construcción total del acueducto. A finales de 1571, se mandó llevar el agua de Santa Fe a la falda norte del Cerro de Chapultepec (Figura 3) para que de ahí se repartiera en canoas mientras se concluía la obra. Los arcos del acueducto empezaron a ser construidos por el Marqués de Montesclaros (1603-1607), y fueron concluidos en 1620 por el virrey Marqués de Guadalcázar casi cincuenta años después de haberse iniciado el proyecto (Peñafiel, 1884). En la Figura 3 se ilustra el recorrido del del acueducto que llevaba las aguas del manantial Santa Fe hacia el acueducto molino del Rey-Chapultepec, donde se unían con las aguas del acueducto Desierto de los Leones.



**Figura 3** Modificado del Plano Topográfico de los Acueductos de Santa Fe y Desierto de los Leones. Mapoteca Orozco y Berra. (1833). Colección O y B 417-20

Para el año de 1620, la caja colectora empezó a suministrar con agua delgada a la parte centro y norte (Moreno, 2008); se catalogaron como “delgadas” ya que tenían menor dureza, a diferencia de las aguas “gordas” como eran llamadas las de Chapultepec. Estas dos entraban juntas a la ciudad por el acueducto de San Cosme (Peñafiel, 1884). La primera era preferida por su calidad y pureza; también menciona que el agua de Chapultepec contenía mayor concentración de sales, por lo que era necesario hervirla. Se solían diferenciar las aguas: por ejemplo, el agua de Chapultepec no era tan clara como la “delgada” y en tiempo de lluvia se necesitaba filtrar o bien, dejarla en reposo para el asentamiento de las partículas que contenía en suspensión y de esa manera hacerla potable (Orozco, 1864).

El agua de Santa Fe conservaba su pureza durante el siglo XVII, pero con el tiempo fue perdiéndola debido a que los molinos ubicados a los lados del canal bajo, que la conducía hacia Tacubaya, la devolvían al ducto después de usarla para mover sus ruedas hidráulicas (Peñafiel, 1884). Por otra parte, el acueducto presentaba

daños a lo largo de su extensión, lo que los pobladores aprovechaban para instalar sus lavaderos. Además, las partes descubiertas estaban al alcance de los animales y en tiempo de lluvia traían consigo los escurrimientos con materia orgánica, de tal manera que esta agua llegaba contaminada hasta los habitantes de la capital.

En el año de 1710, también se proveía agua, por medio de varios ramales, a los barrios de La Concepción, San Lorenzo, El Carmen y Santa María (Carrera, 1949). Para el año 1750, el acueducto alimentaba ciento ochenta fuentes particulares y siete fuentes públicas (Orozco, 1980). Sin embargo, al aumentar los requerimientos de agua, se vio la necesidad de unir tanto el acueducto de las aguas de los Leones como el del Desierto en 1786, con las cuales la caja principal dio servicio a San Francisco, Palacio Real, San Lorenzo y La Santísima.

En 1789 se reconstruyó un muro que salvaguardaba los afluentes del manantial, en la cual se menciona al Regidor Ignacio De Castera arquitecto y urbanista, quien entre varias obras mejoró el acueducto de Santa Fe para conducir el agua delgada a hasta la caja distribuidora de la Casa Mariscala cerca de donde hasta ahora se encuentra el Palacio de Bellas Artes (Covarrubias, 2015).

Años más tarde, en 1806, recibían servicio 380 fuentes, veintisiete públicas, así como una gran cantidad de establecimientos de diferente giro (Bernárdez de la Granja, 2012). A pesar de que existían problemas previos al exportar el agua de Santa Fe, tales inconvenientes continuaron durante los primeros años del siglo XIX (Peñañiel, 1884), debido a la falta de mantenimiento en las obras y los daños ocasionados por los sismos, lo que provocaba que el caudal llegara reducido a la ciudad. En 1857 la obra suministraba 163 l/s de parte de Santa Fe (IMTA, 1989), mientras que para el año de 1864 Orozco y Berra calculó una disponibilidad de 584 l/s, de los cuales 343 l/s los aportaban los acueductos. Conforme a los estudios realizados en 1984, el Ing. Antonio Peñañiel, supuso que, en años anteriores; el caudal que llegaba a la ciudad era superior al que se tenía a finales del siglo XIX. También propuso canalizar los caudales a tuberías para disminuir su contaminación debido a la exposición que tenía durante el trayecto y la pérdida del volumen (IMTA, 1989)

El proyecto concluyó en 1889 y, por lo tanto, se ejecutó la demolición del acueducto. De tal manera, el sistema de abastecimiento de agua potable quedó conformado con las aguas del Desierto de los Leones, Chapultepec, Río Hondo y por diversos pozos privados que empezaban a incorporar sus aguas dentro del sistema de distribución (Peñañiel, 1884). En ese mismo año, el líquido ahora llegaba la ciudad por medio de tuberías, con un caudal de 770 l/s de los manantiales, 220 l/s de parte de Chapultepec, 150 l/s de Santa Fe y Desierto de los Leones y 400 l/s del Río

Hondo (IMTA, 1989). La anterior situación desembocó en el descontento tanto de los habitantes de los pueblos donde se localizaban los afluentes y de aquellos que solían aprovechar el agua a cielo abierto.

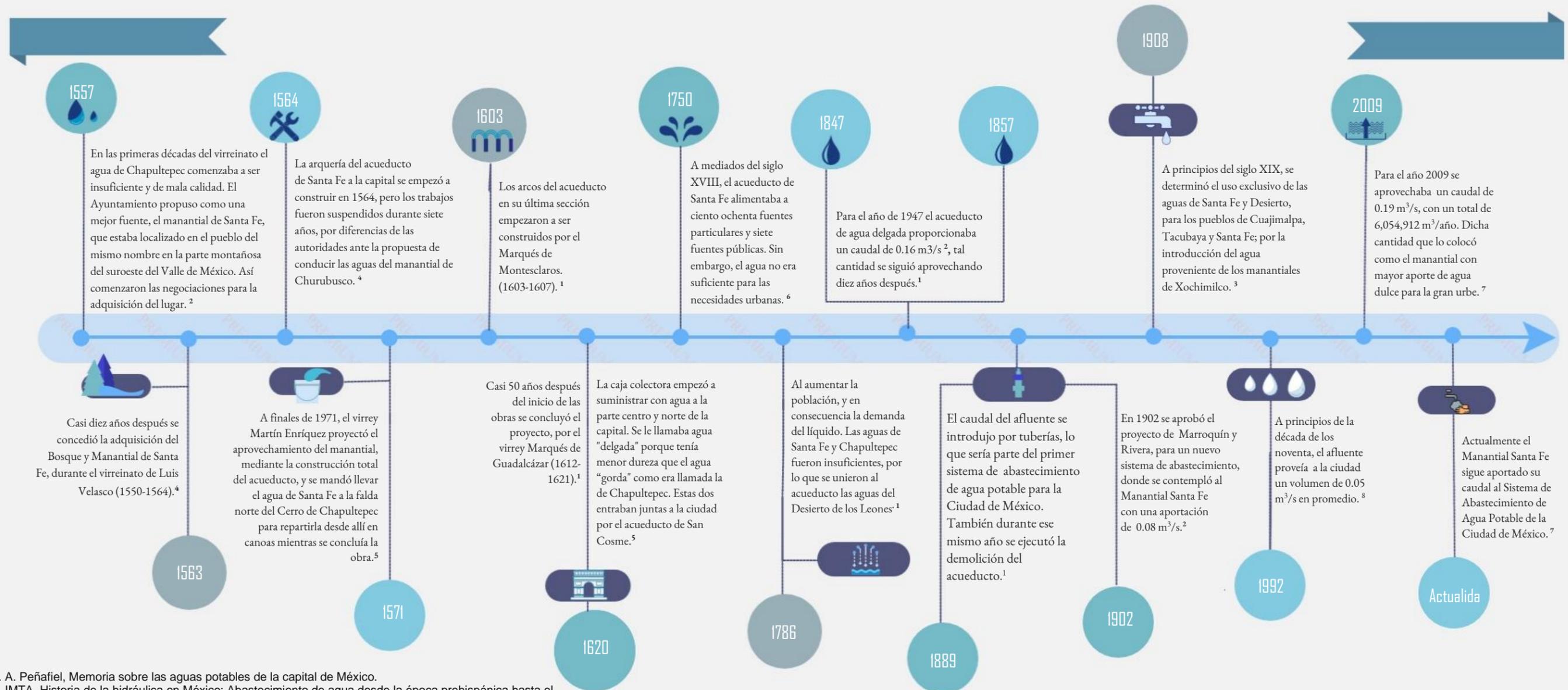
Finalmente, en 1908, dejaron de distribuirse las aguas de Santa Fe y Desierto de los Leones en la capital, dejando el aprovechamiento exclusivo para los pueblos de Santa Fe, Cuajimalpa y Tacubaya, debido a la introducción del agua proveniente de los manantiales de Xochimilco (Bernárdez de la Granja, 2016).

La siguiente Figura 4, presenta en una línea del tiempo, un resumen de los hechos relevantes del aprovechamiento del manantial Santa Fe, desde la adquisición del manantial hasta su servicio en la actualidad.

## Línea del Tiempo

# Aprovechamiento del Manantial Santa Fe

1557-Actualidad



1. A. Peñafiel, Memoria sobre las aguas potables de la capital de México.
2. IMTA, Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato.
3. M. Bernárdez, La huella del siglo XX: El acueducto de Xochimilco y el Sistema Lerma.
4. Orozco y Berra, Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México.
5. R. Moreno, Arquitectura hidráulica en la Nueva España.
6. María del Carmen Bernárdez, Acueducto de Xochimilco.
7. Escolero et al, Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México.
8. SACMEX, Estudio y Cuantificación de los Manantiales del Poniente.

Figura 4 Línea del tiempo del aprovechamiento manantial Santa Fe

## 2.4. Importancia de su Conservación y Caracterización Hidrogeológica

Una de las vulnerabilidades más importantes de la Ciudad de México yace en la limitación de no contar con las fuentes suficientes para el suministro de agua potable que requiere para sustentar las diferentes necesidades urbanas de su población. Lo anterior, orilla a los distintos organismos encargados de la gestión del agua a tratar de complementar el total del líquido por medio de fuentes de abastecimiento externas. Por otra parte, la extracción excesiva y constante de agua subterránea del acuífero (que tal vez requiera miles de años para recuperar su nivel original) reduce día con día la disponibilidad del agua. Sin embargo, una fuente natural de provisión de agua subterránea, ante esta situación han sido los manantiales que florecen en la ciudad.

En la actualidad, la mayoría de los manantiales que aportan su caudal para su servicio y, que se encuentran bajo supervisión del SACMEX, se localizan en la zona de conservación de la Ciudad de México. Sin embargo, el manantial de interés en este estudio se encuentra en suelo urbano y expuesto a toda actividad antropogénica que lo rodea. El afluyente ha contribuido a la sociedad con sus aguas de manera permanente, desde la época colonial hasta la actualidad y, además, es la única fuente de abastecimiento de este recurso para los habitantes de su alrededor.

Los manantiales históricamente no solo ha sido una fuente primordial de agua dulce, sino que también su agua ha sido utilizada para diferentes actividades que sustentan la vida del hombre y en algunas regiones llega a ser la única fuente para su consumo que, en muchas ocasiones, no requiere ningún tipo de tratamiento para cumplir con los estándares de agua potable (Kreye et al., 1996). Además, la presencia de los manantiales es vital para los diferentes ecosistemas donde se encuentran, pues la biodiversidad en su fauna y vegetación, en varios casos se llega a considerar como “rara” o endémica (Fullen et al., 2016; Springer & Stevens, 2009)

A pesar de su importancia, la información disponible referente a los manantiales y su funcionamiento hidrogeológico, es limitada debido al poco estudio que se ha hecho sobre el subsuelo, por la falta de visibilidad física que sufre y que limita la atención académica que recibe. Como resultado, el desconocimiento de su funcionamiento hidrogeológico limita una adecuada gestión y preservación; pues al desconocerse la ubicación de donde se origina su recarga o su sensibilidad a las actividades de uso de la tierra hasta su zona de afloramiento, no se implementan las medidas necesarias para salvaguardar la integridad de la cantidad y calidad del agua subterránea que aportan los manantiales.

De acuerdo con Kreye et al. (1996) el flujo de agua subterránea de los manantiales (y del área donde se encuentran), se rige principalmente de la relación de tres factores naturales: geología (tipo, distribución y características de permeabilidad de las unidades geológicas), topografía (las formas del terreno y relieve) y clima (periodicidad y cantidad de precipitación). Por lo tanto, su funcionamiento hidrogeológico es fuertemente influenciado por las alteraciones que puedan ocurrir en dichos factores. Sin embargo, los manantiales que se encuentran cerca de los asentamientos humanos, se encuentran propensos a mayor alteración de su desarrollo natural, ya que la actividad del hombre tiende a modificar su entorno.

Ante esta situación, para poder amortiguar las repercusiones de las alteraciones antropogénicas a los principales componentes de agua subterránea y, delimitar zonas adecuadas para su protección y conservación, es necesario caracterizar su entorno hidrogeológico (Jensen et al., 1997; Kreye et al., 1996).

Jensen et al. (1997) mencionan que para la caracterización hidrogeológica de un manantial, es necesario la obtención y análisis de la mayor información que se pueda recopilar de las siguientes características del sitio donde yace: geología (mapa superficial geológico, fallas, fracturas, estratigrafía), topografía, hidrología (corrientes cercanas, cuenca hidrográfica), hidrogeoquímica (iones mayoritarios, isotopía, elementos traza, calidad), hidrogeología (delimitación de acuíferos, recarga, descarga del afluente, balance, transmisividad, mapas potenciométricos y/o piezométricos), estudios geofísicos. Por su parte Kreye et al. (1996), de manera similar sugieren la elaboración de un mapa conceptual hidrogeológico con base a las mismas características, donde además se incluye clima, el tipo y uso de suelo, así como la vegetación del sitio del manantial en cuestión. Como resultado, toda la información recopilada se sintetiza en un mapa conceptual hidrogeológico, en cual se resumen los datos obtenidos y permite interpretar el tipo de manantial que se quiere caracterizar.

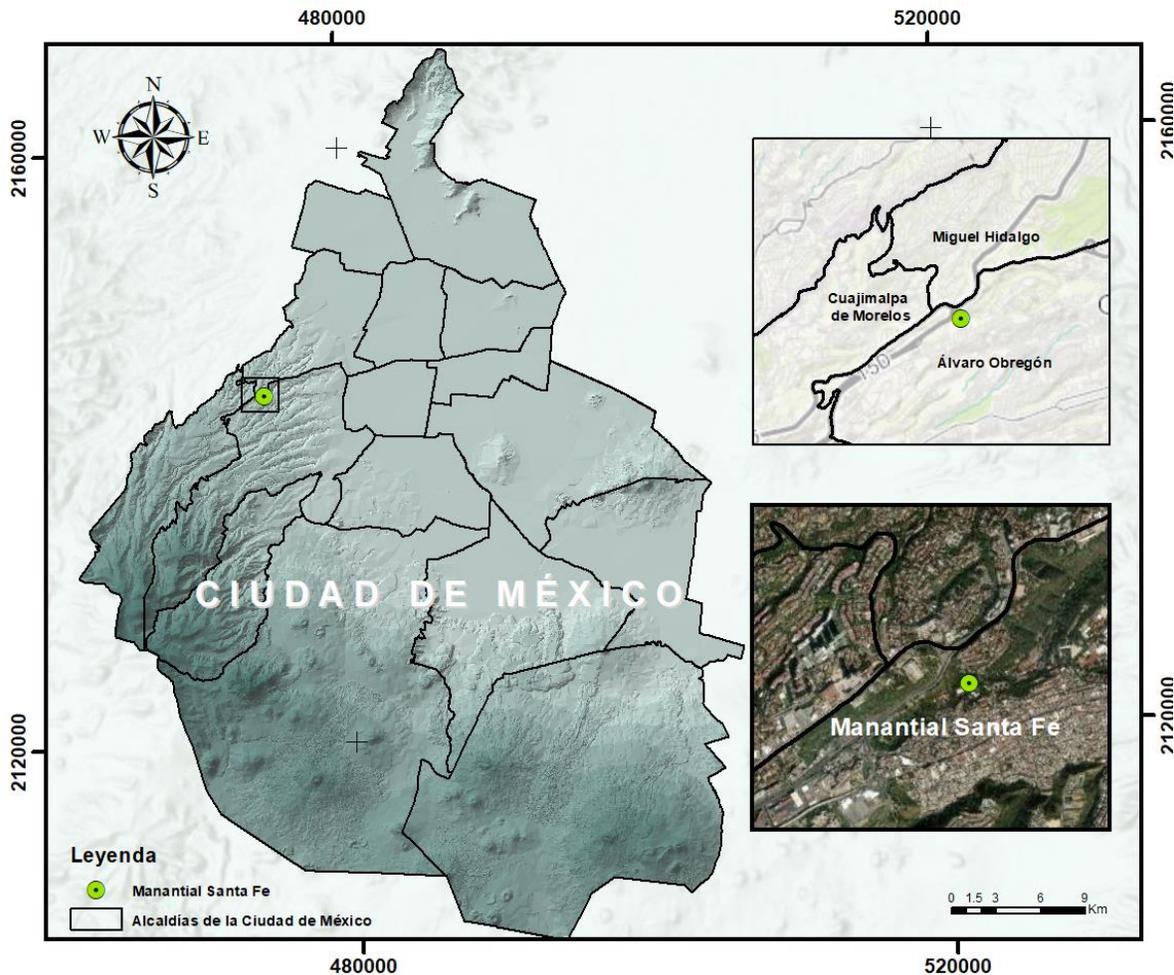
Los autores ya mencionados, enfatizan la elaboración de un mapa conceptual hidrogeológico y la identificación del tipo de manantial, de tal modo que sea posible identificar adecuadamente los factores que controlan e influyen en su flujo de agua subterránea, en otras palabras; tener una idea de su funcionamiento hidrogeológico y, conforme a este, aplicar medidas que permitan mejorar la protección y gestión para los afluentes. Esto se debe a que el agua se comporta de acuerdo con el medio en que se encuentre, por lo que, al complementar toda la información disponible, es posible describir con cierto grado de aproximación el funcionamiento del sistema hidrogeológico de la zona de estudio. Por lo tanto, una caracterización adecuada faculta proponer medidas efectivas para controlar o revertir problemas de contaminación y su vez dar sugerencias sobre cómo usar mejor el recurso y gestionarlo óptimamente.

El presente estudio, de carácter hidrogeológico, tiene como enfoque al manantial Santa Fe (cuyas aguas han sido aprovechadas desde hace cuatro siglos), que se localiza en una zona importante de recarga para el acuífero, cuya descarga es significativa para el sistema de agua potable e indispensable para la sociedad que lo rodea ya que es su única fuente de este recurso. Por lo tanto, se espera que el trabajo coadyuve a un mejor aprovechamiento y administración del afluente por parte de las entidades que se encargan de su gestión.

### 3 Descripción de la Zona de Estudio

#### 3.1. Localización

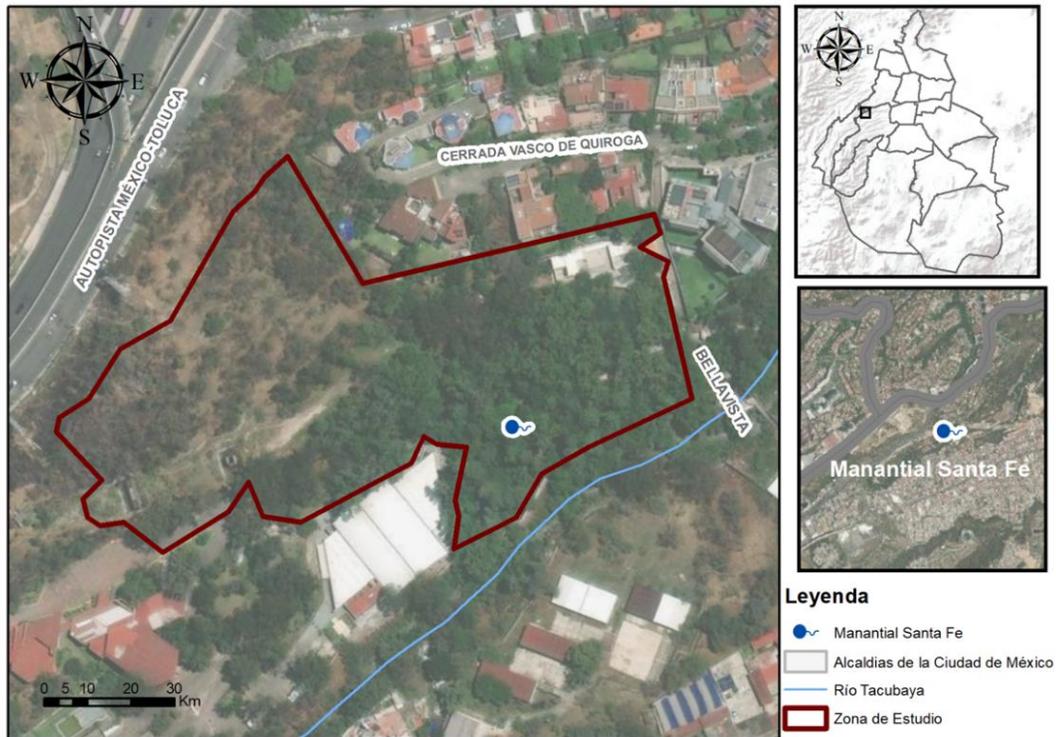
La zona de estudio de la presente investigación se localiza en la alcaldía Álvaro Obregón (al poniente de la Ciudad de México) cerca de los límites con Cuajimalpa y Miguel Hidalgo (Figura 5). Entre el pueblo de Santa Fe y Lomas de Chapultepec, se sitúa el Manantial Santa Fe que es aprovechado por el SACMEX para abastecer a los residentes de sus inmediaciones.



**Figura 5** Mapa de localización del sitio de estudio  
Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO

El manantial tiene sus coordenadas latitud norte  $19^{\circ} 23' 05.1''$  y longitud este  $99^{\circ} 14' 31.9''$ , a una altura de 2,400.627 m.s.n.m y se encuentra dentro del predio de captación para abastecimiento de agua potable perteneciente al SACMEX (Figura 6). El acceso al predio se encuentra en la calle Bellavista de la colonia Santa Fe,

dentro de la alcaldía Álvaro Obregón, al transitar el puente que se localiza sobre el cauce del río Tacubaya con dirección al norte (Figura 6).



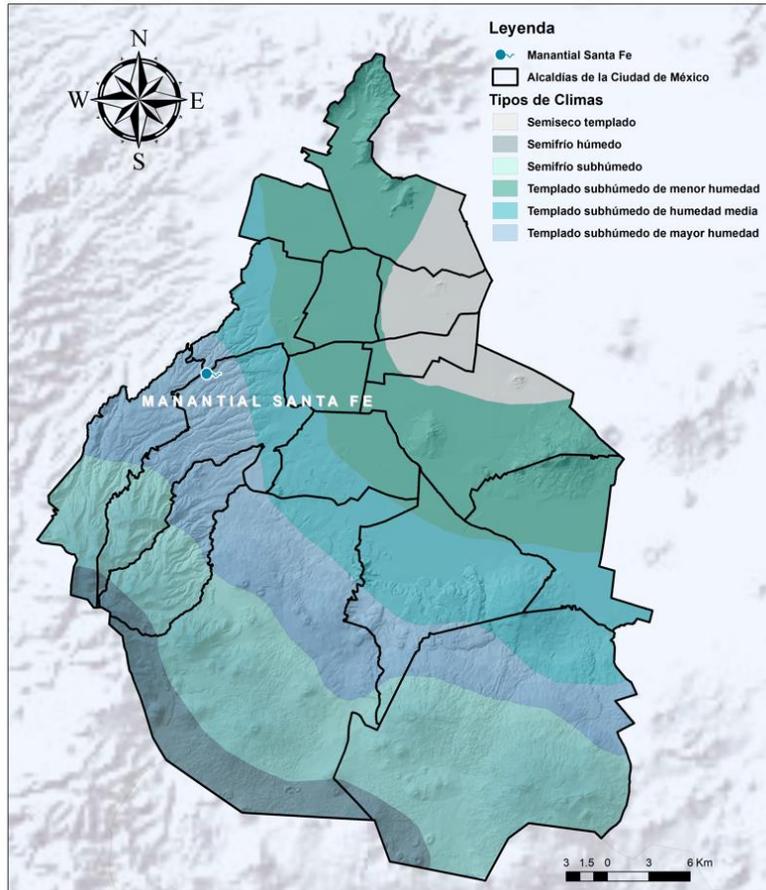
**Figura 6** Zona de estudio (predio de captación)

El área de captación de agua potable tiene como objetivo recolectar el flujo de los afloramientos que se generan en el manantial y a su vez distribuirlo para su servicio en las colonias aledañas. Para algunas de estas colonias, su abastecimiento de agua potable es solventado únicamente por el gasto proporcionado por el afluente. Aunado a lo anterior, el manantial se localiza en zona en la que, en su mayoría, el uso de suelo es urbano (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018) y a comparación de algunas otras fuentes de agua potable, no se ubica en una zona de conservación (Escolero et al., 2009).

### 3.2. Clima

Para entender mejor el comportamiento hidrológico de una cuenca es necesario conocer su climatología más a fondo; la información de dicho sitio no sólo permite conocer el estado actual de ésta, sino que también ayuda a la proyección de eventos futuros que podrían causar un impacto significativo (Belitskaya, 2010).

La Ciudad de México consta de varios climas, definidos en gran parte por su relieve heterogéneo en el que, dependiendo de su elevación, presenta cambios en sus factores climatológicos, por lo que no existe uniformidad. Además, el clima puede alterarse debido a los sistemas regionales del tiempo atmosférico provenientes de puntos lejanos (ciclones, tormentas tropicales, etc.), o bien, por la acción del hombre (cambios de uso de suelo, contaminación atmosférica, entre otros (Jáuregui, 2000).



**Figura 7** Tipos de climas en la Ciudad de México.  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

### 3.2.1 Temperatura

En la Ciudad de México se presentan los climas: templado subhúmedo en su mayor parte; semifrío subhúmedo y en una porción mínima de tipo semiseco (INEGI, 2017). En la zona de estudio de este trabajo se presenta una cualidad montañosa importante, por lo que existe una predominancia del clima templado subhúmedo C (w2) (w) (Figura 7). Lo anterior se debe a las diferencias de relieve y altitud (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018).

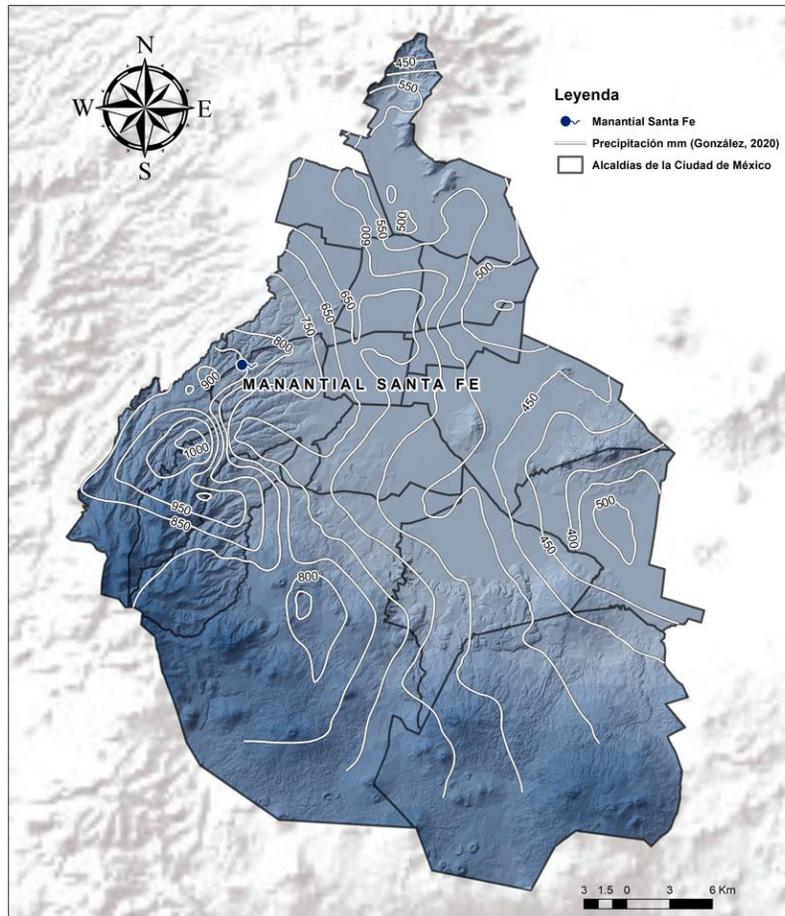
El clima templado subhúmedo se caracteriza por tener alta humedad, lluvias en verano, sequía en invierno y una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C. Además, las temperaturas en el mes más frío, que es enero, suelen estar entre los valores de -3 °C y 18 °C (INEGI, 2005).

### 3.2.2 Precipitación

La lluvia es la principal fuente para la recarga natural de los acuíferos y, por ende, de los manantiales (Custodio & Llamas, 1983). Debido a esta relevancia, es muy conveniente entender su comportamiento y presencia en la cuenca, así como su impacto en los caudales (Ordoñez, 2011).

En la Ciudad de México la temporada de precipitaciones se presenta en los meses de mayo a octubre, y la temporada de estiaje de noviembre a abril (Paradinas, 2015). Además, su ubicación permite que los eventos de precipitación, ordinarios o extremos, en su mayoría logren modificar o acentuar el valor de lluvia registrado anualmente, el cual puede variar de una zona a otra (CONAGUA, 2018b).

Por otra parte, la altitud toma un valor muy importante cuando se presentan lluvias en los lugares con pendientes significativas, por lo que es necesario aclarar que existe una precipitación diferente para los sitios más altos de la ciudad (INEGI, 2002b). De acuerdo con los datos históricos de precipitación de 1993 a 2007, se encontró un valor anual promedio de 371.5 mm/año para la parte este, mientras que para la parte oeste (con mayor altitud) se estimó de 1080.13 mm/año (González, 2020). Respecto a la zona de estudio, el manantial se ubica donde se presentan 850 mm/año (Figura 8).

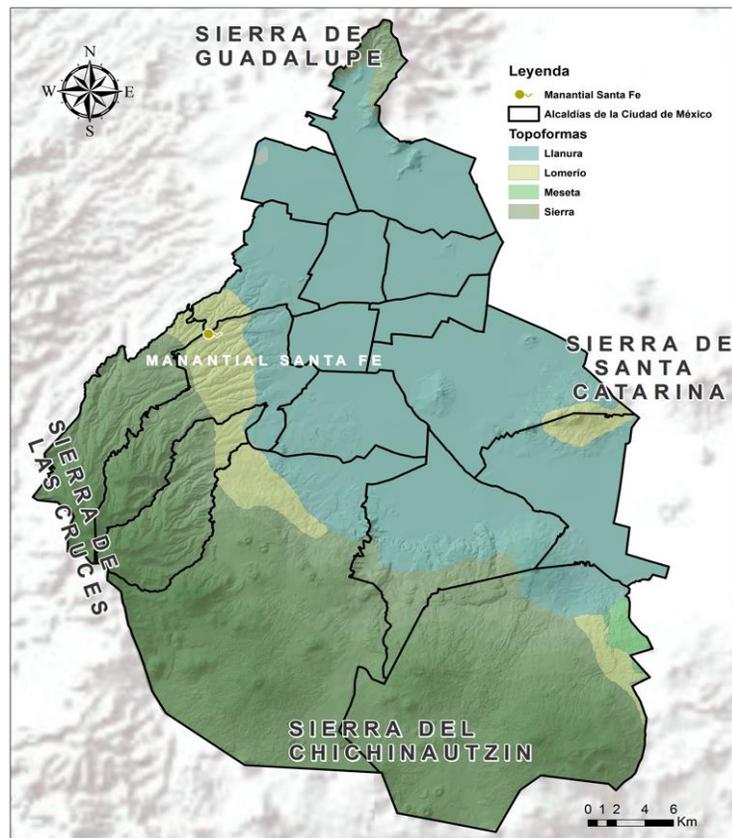


**Figura 8** Precipitación promedio anual (mm) de la Ciudad de México 1993-2017.  
Fuente: Modificado de González, 2020

### 3.3. Fisiografía

Apoyada en la geología y topografía, la fisiografía no sólo proporciona el conocimiento del relieve de una región, sino que permite, además, la identificación de sus principales rasgos, así como proveer la explicación de los procesos que intervinieron en su modelado y que le han dado su aspecto actual (INEGI, 2008). La Ciudad de México se ubica en la región del Eje Neovolcánico, que se extiende de este a oeste atravesando el territorio nacional. Cuenta con la característica de tener un suelo con gran variedad de rocas (INEGI, 2017). Además, se encuentra dentro de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, que está conformada por cuatro sistemas de topoformas: de tipo sierra (con un 48.00% de la superficie total), la llanura, (con un 45.03%), el lomerío (con otro 6.42% y, finalmente, la meseta (con 0.55%) (INEGI, 2002b).

Las principales elevaciones topográficas de la gran urbe tienen un origen volcánico, como son la Sierra de Las Cruces al poniente, la Sierra Chichinautzin al sur y el volcán del Ajusco al suroeste. Además, en el valle existen algunas estructuras volcánicas apartadas, como la Sierra de Santa Catarina, el Peñón de los Baños, el Peñón del Marqués y el Cerro de La Estrella, entre otros (INEGI, 2002b). El área de interés se localiza en los lomeríos que se encuentran en las faldas de la Sierra de Las Cruces, que conforman parte de la fisiografía de la alcaldía Álvaro Obregón (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018), dado que ahí es donde se encuentra el afluente Santa Fe (Figura 9).



**Figura 9** Fisiografía de la Ciudad de México.  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

### 3.4. Hidrología

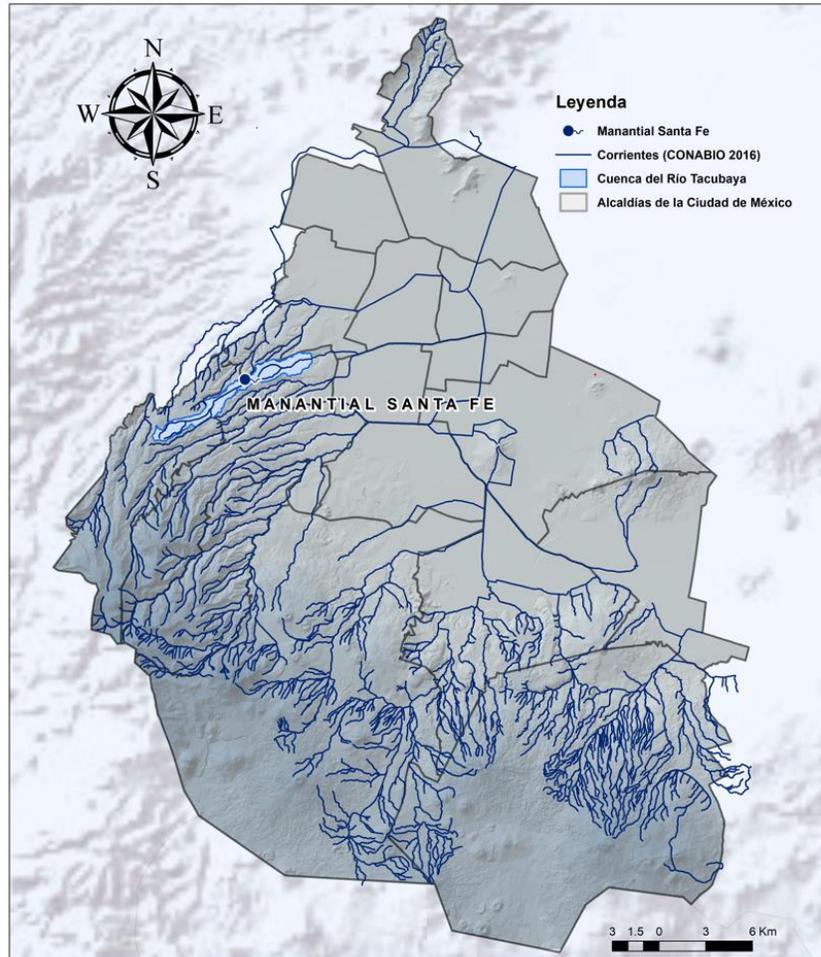
La hidrología no solo permite interpretar el movimiento del agua dentro de una cuenca, sino que adicionalmente expone sus componentes hídricos; que son producto del ciclo del agua en conjunto con otros factores, tanto naturales como antropogénicos (Ángel de Miguel et al., 2009). Uno de estos componentes es el

agua superficial, cuya interacción con el agua subterránea es muy importante dentro de la Ciudad de México, ya que la recarga a los acuíferos proviene principalmente de la infiltración de la escorrentía, que es generada por las lluvias de mayor intensidad y suelen ocurrir en las partes altas de la cuenca (Carrillo-Rivera et al., 2008).

La región hidrológica a la que pertenece la cuenca de la Ciudad de México y su acuífero sustentador es la No. 26 llamada Alto Pánuco y se localizan específicamente dentro de la subregión III “Valle de México” (CONAGUA, 2020). La cuenca originalmente estuvo compuesta por un sistema lacustre, que en menor medida presentaba manantiales y ríos no muy caudalosos. Sin embargo, conforme avanzó la población urbana, el volumen de los cuerpos de agua se redujo y, en consecuencia, el de sus corrientes superficiales (Banco Mundial, 2013). De estas últimas, las principales aún existentes que descienden de las sierras, generalmente son de carácter perenne y, en su mayoría, atraviesan de poniente a norte la ciudad (Figura 10).

En adición, algunos ríos han sido entubados debido a los altos grados de contaminación por las descargas residuales recibidas a lo largo de sus cauces y para evitar los desbordamientos causados por las abundantes lluvias (Arsenio, 2010). Por otra parte, otras aguas superficiales han sido sometidas a un proceso similar, pero con el propósito de solventar la demanda de agua potable, ya que contienen agua derivada de manantiales y corrientes pluviales (Banco Mundial, 2013). Con el mismo fin, el afluente en estudio se encuentra integrado al sistema de agua potable de la ciudad.

El manantial Santa Fe se encuentra dentro de la subcuenca del Río Moctezuma, conformada por flujos que son mayormente producto de la escorrentía de la Sierra de las Cruces; tanto constantes como intermitentes y en general, con dirección al noreste hacia los bajos niveles de la cuenca. La corriente superficial más cercana es el río Tacubaya cuyo cauce transita a escasos metros del afloramiento (Figura 6).



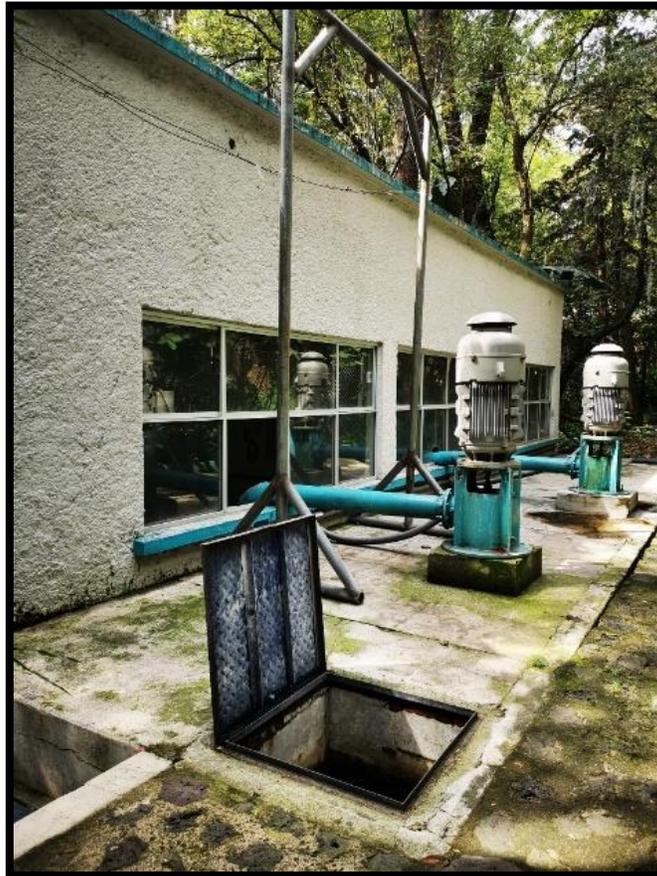
**Figura 10** Hidrología de la zona del manantial.  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

### 3.5. Trabajo de campo

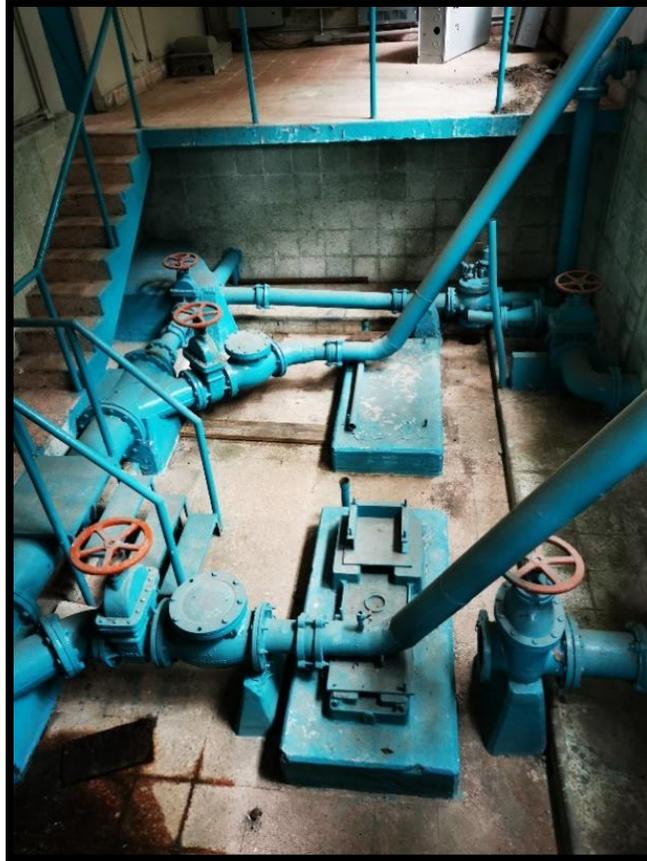
Para la recolección de datos se realizó una visita de campo al predio de captación del manantial Santa Fe el día 28 de septiembre del año 2022. La visita al predio consistió en el reconocimiento de la zona de estudio; la infraestructura de captación de los afluentes del manantial al sistema de agua potable, la observación de las características relevantes en el área de descarga de los afluentes; medición in situ de parámetros fisicoquímicos (parámetros que pueden ser rápidamente alterados) a las aguas del manantial, recolecta de muestras para análisis hidrogeoquímico en laboratorio, así como el aforo del afluente que aporta caudal a los humedales artificiales que se encuentran al lado del cauce del río Tacubaya.

### 3.5.1 Infraestructura

El predio cuenta con varias cajas de captación para la canalización de los afluentes, algunas se encuentran superficialmente y otras son subterráneas. El agua es conducida por conductos y tuberías hacia la galería principal, donde se concentran todos los caudales recolectados. Consecuentemente, el agua es dirigida de la galería principal a un cárcamo de bombeo (Figuras 11 y 12), a fin de abastecer de agua potable a las colonias aledañas. Además, algunas colonias reciben el suministro por gravedad.



**Figura 11** Exterior del cárcamo de bombeo



**Figura 12** Interior del cárcamo de bombeo

El predio contiene seis cajas de captación principales ubicadas hacia el norte y poniente del predio; una caja de infiltración hacia el poniente; en el centro con cinco cajas de captación subterránea y una superficial. Esta distribución es debido a que la descarga del flujo no ocurre en un solo lugar, sin embargo, a mayoría de las cajas son subterráneas y se pueden observar en la parte central del predio (Figura 13a).

Mientras que en la parte poniente del predio, la caja de captación es destinada para conducir el afluente que se encuentra al lado de la alberca, el cual proporciona un caudal importante (Figura 13b). El caudal es captado y conducido por gravedad hacia la galería principal mediante un conducto subterráneo, además, es el más alejado de la galería.

Por otra parte, el sistema de captación en el predio también dispone de estructuras superficiales de mampostería, como conductos, que se encargan de conducir los gastos superficiales captados en las diferentes tormentas, con lo que se deduce, que trabajan en conjunto con las aportaciones subterráneas y superficiales.



**Figura 13** Cajas de captación

El agua del manantial es enviada al Pueblo de Santa Fe, Pueblo Nuevo y Lomas Altas, por medio de bombeo y por gravedad a diferentes zonas: El Capulín, Liberales de 1857, Bellavista y Lomas de Bezares y a la Zona Militar. Cabe aclarar que algunas de estas colonias solamente reciben suministro de agua potable de los caudales que emanan del manantial.

Respecto a las características relevantes del predio, es importante mencionar que en la parte central se puede observar un suelo con abundante vegetación y humedad (Figura 14, a y b), donde también se encuentra un venero producto de otro afloramiento (Figura 14c). En cuanto a la parte poniente, que es donde se encuentra un afluente que aporta un caudal considerable, se puede observar vegetación en menor medida (Figura 14d).



**Figura 14.** Vegetación dentro del predio

En general, la vegetación del suelo en el predio es abundante, sobre todo en la parte centro (donde se ubican la mayoría de las cajas de captación) se puede observar una densa vegetación y un suelo saturado. Lo anterior, difiere de la vegetación que se localiza al poniente y norte de ladera.

Aunque el manantial Santa Fe descarga en una zona con tipo de suelo Feozem (Secretaría de Protección Civil, 2014), el cual se considera rico en materia orgánica y puede presentar casi cualquier tipo de vegetación (Ramos, 2003), la diferencia entre la vegetación que se presenta en gran parte del área del predio con respecto

a la predominante de la periferia, también indica cercanía del nivel freático (Naumburg et al., 2005) ya que se puede observar una mayor densidad de vegetación.

### 3.5.2 Muestreo y Aforo

Con el fin de obtener mayores características del agua que emana en los veneros del predio, se realizaron dos muestreos para su análisis en laboratorio y medición in situ de parámetros fisicoquímicos en distintas partes del predio. En adición se realizó un aforo al afluyente que provee su caudal a los humedales artificiales que se encuentran entre el predio y el cauce del río Tacubaya.

Para la obtención de dos muestras de agua para laboratorio, se seleccionó dos lugares representativos: la subgalería principal y el afluyente que se ubica al poniente del predio (Figura 15). En este caso se implementó el muestreo manual y se utilizaron recipientes esterilizados de 500 ml. A las dos muestras, se les preservó su integridad hasta su traslado al laboratorio.

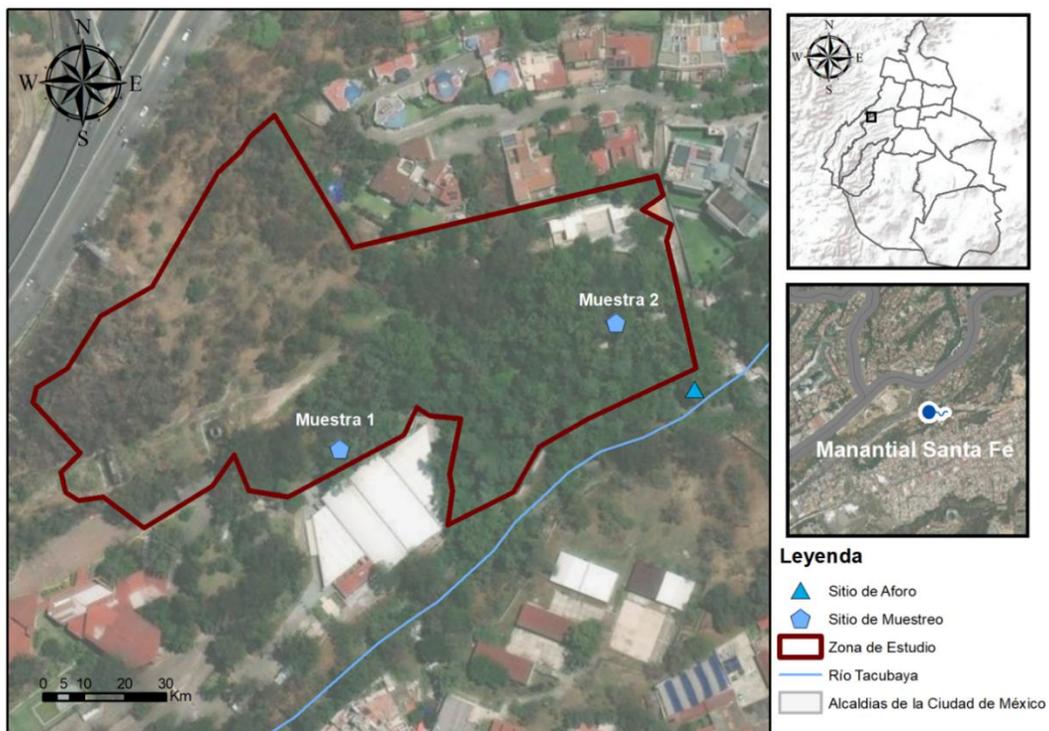


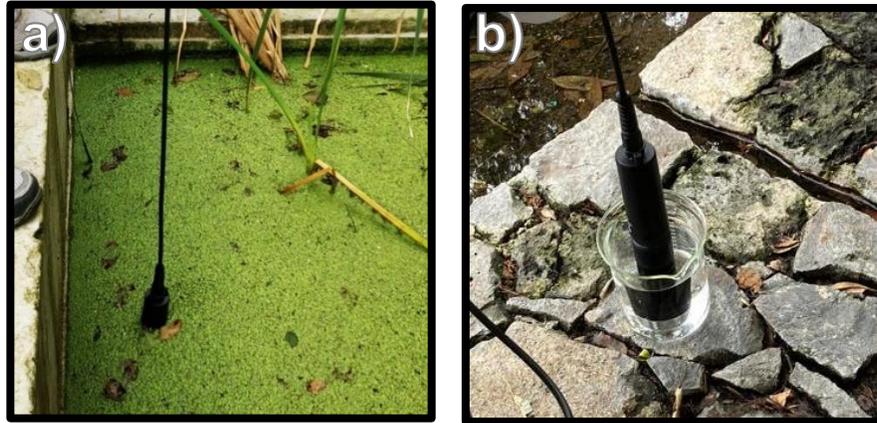
Figura 15. Sitios de muestreo y aforo

Para la medición in situ de parámetros fisicoquímicos, se utilizó el equipo multiparamétrico Hanna modelo HI98194. Con este equipo se midió en tiempo real en el agua los siguientes parámetros: Eh, pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), oxígeno disuelto (OD), temperatura, salinidad, resistividad y la presión atmosférica. La medición se realizó tanto en el interior como fuera del predio. Principalmente donde se pudo medir directamente u obtener una muestra de agua de los afluentes (Figura 15). Para este último caso, se utilizó un vaso de precipitados para capturar muestras de agua en sitios donde no se pudiera realizar la medición directa.

La medición se realizó en cinco lugares; en el venero ubicado en la parte central del predio (Figuras 16, a y b), en la subgalería principal (Figura 16c), agua del grifo proveniente de la galería principal (Figura 16d), sitio de aforo (Figura 17a), humedal artificial (Figura 17b).



Figura 16. Medición de parámetros in situ



**Figura 17.** Medición in situ a humedal y sitio de aforo

En cuanto al aforo, este se realizó a las afueras del predio por el acceso de Bellavista, a una altura muy cercana del cauce del río Tacubaya. Ahí se localiza un venero que es conducido a través de una tubería hacía un costado del río y su caudal se canaliza hacia los humedales artificiales (Figura 18), a dicho caudal se le realizó el aforo.



**Figura 18.** Sitio de Aforo

Para realización de la medición del caudal del venero mencionado, se utilizó el método directo. Mediante un recipiente de volumen definido y la medición del tiempo de llenado con un cronómetro. Con un total de seis pruebas, se obtuvo suficientes mediciones de tiempo y volumen, para calcular los caudales por cada prueba. A partir de estos caudales se obtuvo un caudal promedio de 1324.6 lt/día, esto equivale a el consumo de casi siete personas, contemplando una dotación de 200 lt/día por usuario.

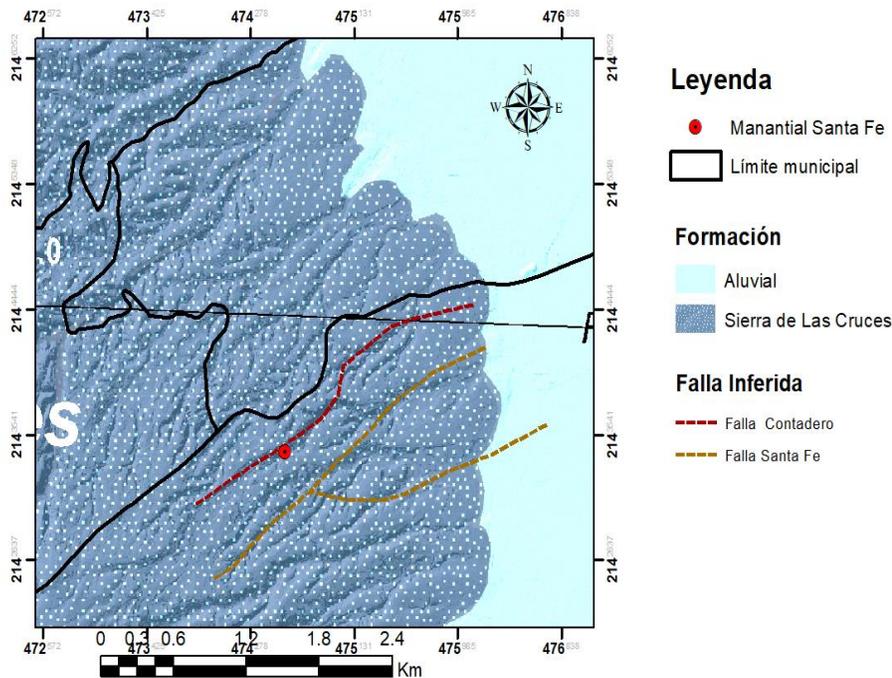
La información recopilada en la visita al predio de captación, se conjunta con las características definidas para el sitio de estudio y las aguas manantial, que se exponen en la siguiente sección para la caracterización hidrogeológica del afluente.

## 4 Marco Conceptual del Manantial

### 4.1. Geología

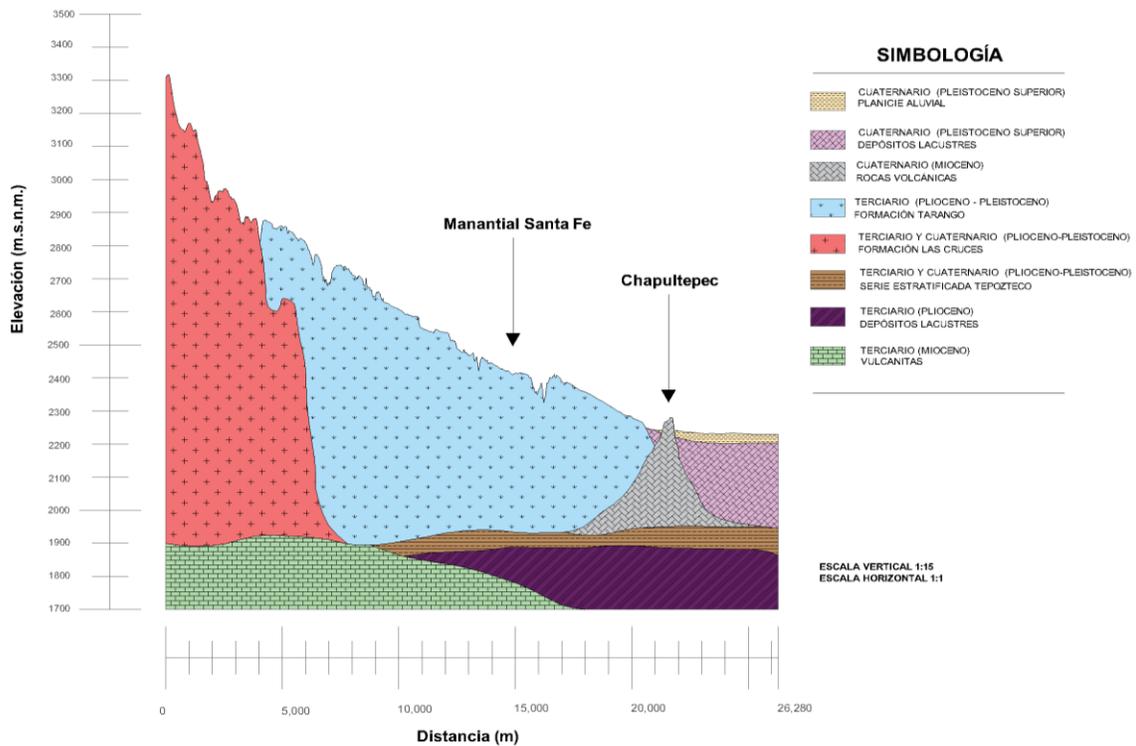
El conocimiento que proporciona el marco geológico de la Cuenca de México permite definir la distribución, naturaleza y funcionamiento de los acuíferos que se encuentran en su subsuelo (Vázquez & Jaimes, 1989). Por esta razón, para entender el funcionamiento del sistema hidrogeológico del manantial Santa Fe, es necesario el conocimiento de las características geológicas primordiales de donde yace.

La Cuenca de México comprende una amplia variedad de rocas del Mioceno al Cuaternario y, debido a esta variedad, no se ha establecido una columna estratigráfica formal (Enciso De la Vega, 1992). Esto ha propiciado que ciertas áreas de la cuenca no estén definidas en una formación geológica, tal es el caso del pie de monte (lomeríos) de la Sierra de las Cruces, donde se ubica el manantial Santa Fe. De modo que, para poder sugerir las propiedades hidrogeológicas que propician el afloramiento del manantial Santa Fe, se dispuso de los datos geológicos y estratigráficos accesibles que existen respecto a la zona de estudio. En la Figura 19 se observa la geología regional del sitio de estudio de acuerdo con Arce et al. (2019) y fallas geológicas inferidas cercanas al manantial (De Cserna et al., 1988; Linares, 2012).



**Figura 19** Geología Regional  
Modificado de Arce et al., 2019

La geología del pie de monte de la Sierra de Las Cruces se caracteriza por estar constituida de depósitos vulcano-sedimentarios; rocas extrusivas, que han definido su litología como Lahar-Toba andesítica (INEGI, 2002a). Estos depósitos, que no están definidos en una formación estratigráfica, han sido considerados dentro de la Secuencia Sierra de Las Cruces (también llamada Formación Las Cruces), que está compuesta principalmente por lavas y depósitos piroclásticos (Arce et al., 2019) (Figura 19). Sin embargo, algunos investigadores han definido a estos depósitos del pie de monte como Formación Tarango (Arellano, 1953; Bryan, 1948; Segerstrom, 1962); ya que esta última se distingue por cierta singularidad y variedad en sus paquetes litológicos. Adicionalmente, de acuerdo con el perfil geológico y estratigráfico regional propuesto por Santoyo et al. (2005), la zona de estudio también forma parte de la Formación Tarango (Figura 20). De la misma forma, a las dos formaciones mencionadas se les atribuye la edad del Plioceno-Pleistoceno.

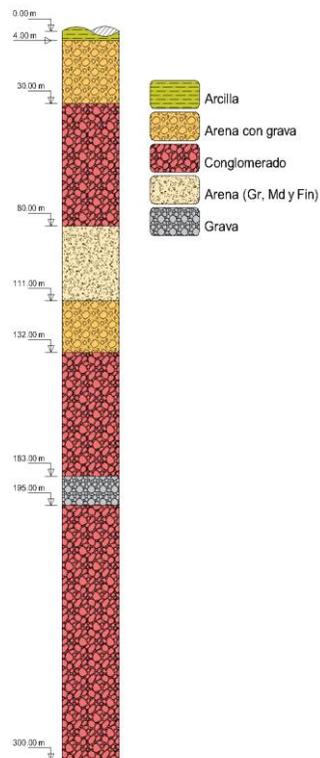


**Figura 20** Perfil Geológico Regional  
Modificado de Santoyo et al., 2005

En general, para el sitio donde aflora el manantial Santa Fe, existen datos de las unidades litológicas referidas a la Formación Tarango, por lo que, para indagar en la composición geológica del área de estudio, se han tomado en cuenta los datos geológicos de las unidades de esta formación.

La Formación Tarango está compuesta principalmente de dos flujos piroclásticos: en la parte superior uno formado de clastos y conglomerados de color gris azulado, conocidos como “arenas azules” y, en la parte inferior; un flujo más antiguo de derrame piroclástico llamado localmente “Cuquita”, constituido de polvo pumítico y fragmentos de pómez, así como de clastos andesíticos y dacíticos de menor tamaño (Mooser & Molina, 1993). Estos dos flujos se encuentran interestratificados con otros materiales: cenizas, tobas, lahares, capaz de pómez, conglomerados y depósitos fluviales (Mooser et al., 1992). Tales materiales han sido mencionados por Lugo-Hubp et al. (1995) como las unidades litológicas principales por las que está constituida la Formación Tarango. También se menciona, que las unidades de piroclásticos finos y pómez, se observan principalmente en la superficie, los conglomerados en las bases de las barrancas, y los derrames de lodos y lahares en desembocaduras fluviales.

La variedad de materiales mencionada, se puede observar en el pozo Lomas de Chapultepec No. 2 (Figura 21), ubicado 1 500 m al norte de la zona de estudio. Se compone de una pequeña capa de arcilla (0-4 m), seguida de una intercalación de arenas con grava (4-30 m), conglomerados (30-80 m) arenas de medianas a gruesas (80-111 m), arenas con grava (111-132 m), conglomerados (132-183 m), gravas (183-195 m) y conglomerado (195-300 m) de origen volcánico.



**Figura 21** Corte litológico del pozo Lomas de Chapultepec No. 2. SACMEX (1994)

Por lo tanto, la variedad de materiales que se pueden encontrar en el pie de monte, favorece la existencia de diferentes propiedades hidráulicas (poca o bastante permeabilidad); lo que también propicia condiciones para que exista el manantial.

En adición, se podría decir que otra característica geológica relevante del área de interés, es que cuenta con la presencia de fallas geológicas y que, además, condicionan la red fluvial de los ríos principales del pie de monte (Fuentes, 2011). Cabe destacar que muy cerca de la zona de estudio, se localiza la falla inferida “El Contadero” con dirección NE-SW, a escasos metros hacia el norte de donde aflora el manantial (Figura 19). Además, Mooser et al. (1992), igualmente mencionan que la barranca donde se localiza el afluente y, donde también transita el río Tacubaya, corresponde a una falla geológica.

#### **4.2. Hidroestratigrafía**

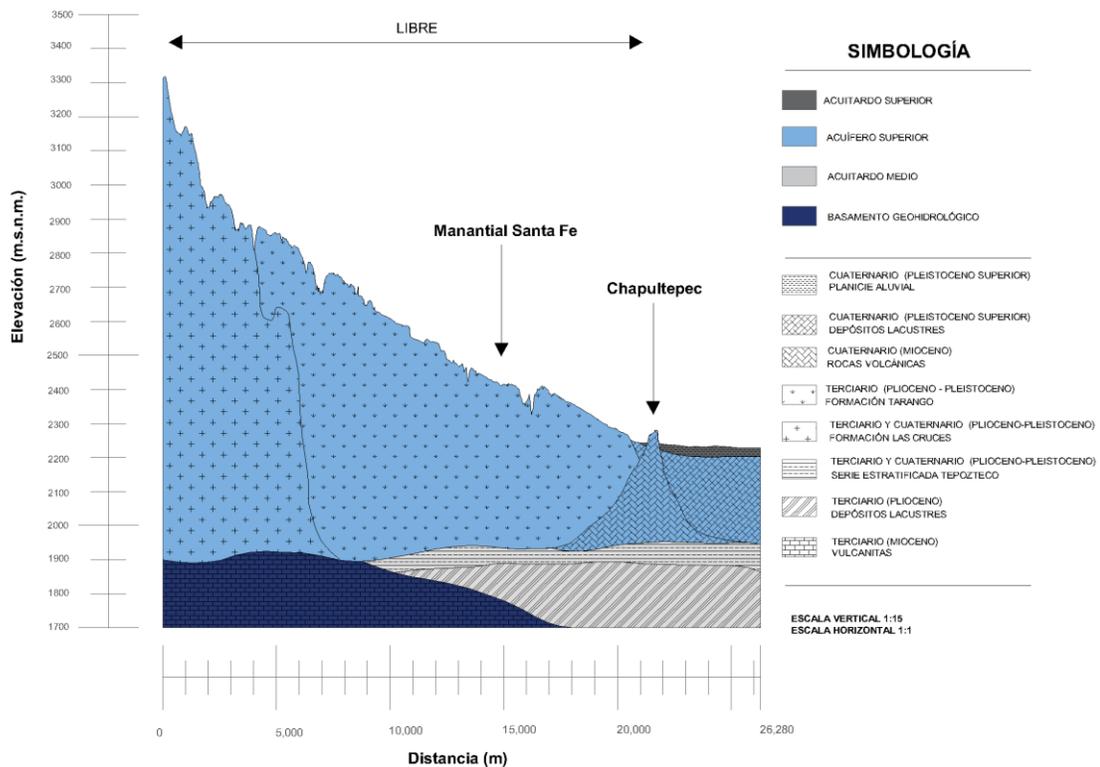
Comúnmente, en los estudios hidrogeológicos, se utiliza el término de unidad hidroestratigráfica para referirse a una o más unidades geológicas, que tienen las mismas características de medio poroso y actúan como una entidad hidrodinámica (Kresic, 2006). El límite hidroestratigráfico puede o no relacionarse con algún límite de una formación, de tal manera que es posible encontrar varias formaciones en una unidad hidroestratigráfica o viceversa (Poehls & Smith, 2009). Para la Cuenca de México se han determinado unidades hidroestratigráficas en distintas ocasiones, debido a que se han considerado diferentes propiedades de las unidades geológicas para definir las.

Las unidades hidroestratigráficas en la Cuenca de México interactúan de manera regional y, generalmente, se agrupan considerando uno o varias propiedades de las unidades geológicas (continuidad o conexión hidráulica, propiedades físicas, litología, hidrodinámica, etc.). Como resultado, las unidades hidroestratigráficas que se han definido en anteriores investigaciones pueden tener diferencias en cuanto a las unidades geológicas que las componen. En este trabajo, para identificar la unidad hidrogeológica correspondiente a la zona de estudio, que se localiza en la Formación Tarango, se tomaron las unidades estratigráficas del perfil geológico regional (Figura 20) y se integraron en las unidades hidroestratigráficas propuestas por Leyva (2010), que consideró las características hidráulicas de las unidades y estudios anteriores. De manera que, las unidades hidroestratigráficas para el perfil regional de este estudio son las siguientes:

- Acuitardo superior: arcillas sedimentarias del Cuaternario (planicie aluvial)

- Acuífero superior (en explotación): rocas volcánicas y depósitos lacustres del Cuaternario, depósitos de las Formaciones Las Cruces y Tarango.
- Acuitardo inferior: series estratificada Tepozteco y arcillas lacustres del Plioceno.
- Basamento geohidrológico (impermeable): vulcanitas del Mioceno.

Estas unidades se pueden observar en el perfil hidrogeológico regional (Figura 22). Cabe destacar que dicha clasificación es en escala regional, puesto que, para entender mejor el comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio, no se debe omitir su relación hidrogeológica con unidades vecinas, ya que estas interactúan de manera regional.



**Figura 22** Perfil Hidrogeológico Regional

En cuanto a la Formación Tarango (donde se localiza el manantial Santa Fe); forma parte de un sector del acuífero superior, de la misma manera que la Formación Las Cruces. Estas formaciones están conectadas hidrogeológicamente; las dos se encuentran en la parte poniente de la Ciudad de México, donde al acuífero se le

considera libre (Lesser y Asociados, 2005) y se le designa como la segunda zona en importancia de recarga para el AZMCD (CONAGUA, 2020).

En cuanto a transmisividad, a la primera formación se le considera de baja a muy baja y a la segunda de media a alta (aunque variable por la diversidad materiales) (Escolero et al., 2009). De manera que, hacia las partes altas de la Sierra de Las Cruces la permeabilidad disminuye, y la mayor parte del agua producto de las precipitaciones escurre hacia las cañadas y barrancas situadas en el pie de monte (Secretaría de Protección Civil, 2014); que también se favorece por la litología de material no consolidado y modificaciones del relieve (Lugo-Hubp et al., 1995). En adición, las barrancas del poniente pese a encontrarse dentro del suelo urbano, son consideradas áreas de recarga (SEDEMA, 2012).

### **4.3. Hidrogeoquímica**

Obtener información acerca del entorno hidrogeológico del agua subterránea es posible por medio de la hidrogeoquímica; dado que su composición varía a través del tiempo, la determinación de sus propiedades químicas, isotópicas y fisicoquímicas, provee información sobre las actividades humanas, y los procesos naturales que causan impacto en el sistema donde el agua se encuentra. De modo que, por medio del análisis de estas propiedades, se puede indagar acerca del origen, edad, condiciones de recarga y posibles mezclas de aguas. De igual manera, estas propiedades proporcionan una idea del probable tipo de roca, composición mineralógica, textura, porosidad, fracturación y compactación, temperatura, tiempo de residencia y presión a la que se encuentra sometida el agua (Martínez, 2015). Debido a que esta información es fundamental para la caracterización hidrogeológica, se realizó un análisis hidrogeoquímico a los parámetros obtenidos en laboratorio y campo.

Como se menciona en la sección 3.5.2 de este trabajo, se realizaron un total de siete mediciones in situ en distintas partes del predio, y se recolectaron dos muestras representativas del agua del manantial (Figura 15) para la obtención de parámetros fisicoquímicos. Como resultado, se obtuvo un total de 37 parámetros: los iones mayoritarios y minoritarios, elementos traza; y los parámetros medidos en campo: temperatura, pH, CE, OD, Eh, STD, resistividad, salinidad; color verdadero, turbiedad e isotopos (Deuterio y Oxígeno 18), a fin de recopilar información acerca del entorno hidrogeológico del manantial.

Los primeros datos analizados fueron los parámetros fisicoquímicos medidos en campo. En general, estos datos no presentaron gran variación en sus valores, aunque se midieron diferentes partes del predio. Los valores de algunos de estos parámetros como; temperatura: entre los 15°; CE :220-240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y STD :110-120 ppm, proporcionaron información significativa para la caracterización hidrogeológica. De acuerdo con Tóth (1963), estos valores de temperatura (cercanos a los de la superficie), CE y STD sugieren un tiempo de residencia corto del agua en el subsuelo, en otras palabras; se asocian a un sistema de flujo subterráneo local.

Ahora bien, aunque los parámetros medidos en campo aportan información, el análisis detallado se enfoca en los resultados obtenidos de iones mayoritarios e isótopos, esto se debe a que mediante su análisis comparten más información confiable para la caracterización hidrogeológica (Tsujimura et al., 2007). Cabe señalar que, para un adecuado análisis e interpretación de los datos químicos obtenidos, es importante calcular el error de balance iónico para comprobar su calidad, para las dos muestras del manantial se obtuvo un error menor del  $\pm 10\%$ , por lo que es confiable utilizarlas para el análisis hidrogeoquímico.

A continuación, se describen los métodos por los cuales se analizaron los resultados de laboratorio de las muestras recolectadas pertenecientes al manantial en estudio.

### 4.1.1 Iones Mayoritarios

A medida que el agua se mueve a través del subsuelo, comúnmente donde más se refleja su trayectoria es en los sólidos totales disueltos y los iones mayoritarios (Freeze & Cherry, 1979). Por consiguiente, se analizaron los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  con el objetivo de identificar las posibles interacciones de agua-roca en el agua del manantial Santa Fe.

Los iones mayoritarios generalmente se pueden analizar respecto a sus valores y con ayuda de representaciones gráficas. Las cuales son un aspecto importante en los estudios de aguas subterráneas (a través de diversos diagramas), debido a que permiten ver los datos de la composición y las cualidades químicas de una manera simple y lo más completa posible (IGME, 1985). Dichas herramientas son eficientes en la interpretación de las propiedades de las aguas y facultan realizar comparaciones, por tal motivo se utilizaron en este trabajo: Stiff que es la representación gráfica de la concentración de los iones mayoritarios (Figura 34d); Piper (Piper, 1944), Mifflin (Mifflin, 1988) y Gibbs, mediante los cuales se determina la familia (facie hidrogeoquímica), sistema de flujo y proceso hidrogeoquímico

dominante. La definición de estos atributos es clave en la caracterización hidrogeológica del manantial.

En los siguientes apartados se exponen los últimos tres diagramas mencionados y que, además, fueron aplicados a las dos muestras de manantial Santa Fe.

### Diagrama de Piper

Para clasificar el agua del manantial en algún tipo de agua o facie hidrogeoquímica, se utilizó el diagrama de Piper, que permite esta clasificación por medio de los iones mayoritarios. Este diagrama está compuesto por dos triángulos equiláteros y un rombo, los primeros representan la composición aniónica y catiónica de las muestras (representadas en porcentaje de meq/l), por otra parte, el rombo proporciona la intersección que define el tipo de familia. El diagrama para las muestras del manantial se observar en la Figura 23.

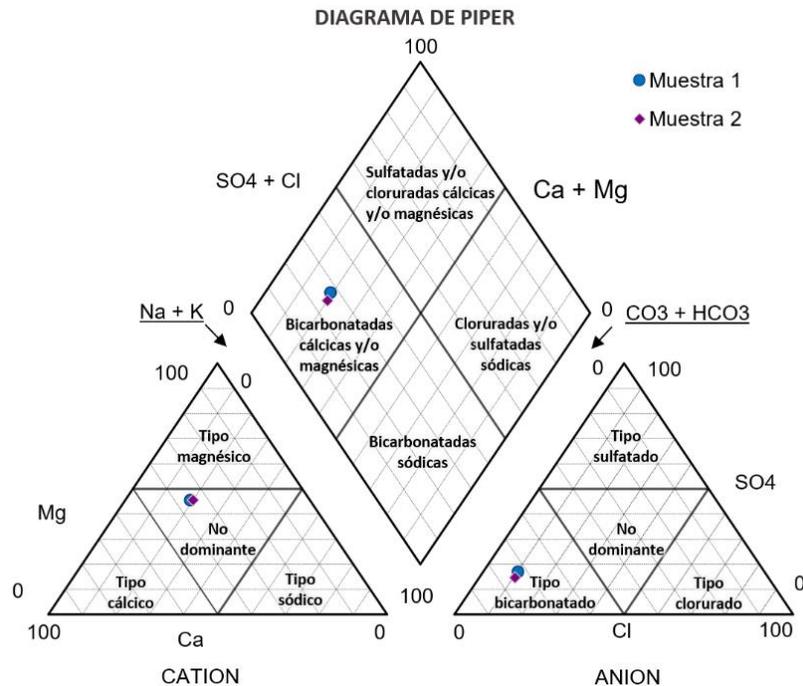


Figura 23. Diagrama de Piper

### Diagrama de Mifflin

El diagrama de Mifflin de manera gráfica hace referencia sobre la evolución del agua subterránea y facilita su categorización en uno de los tres tipos de flujo. Por medio la suma de los aniones ( $SO_4^{2-} + Cl^-$ ) y cationes ( $Na^+$  y  $K^+$ ) en meq/l (en una escala

logarítmica), el diagrama resalta el aumento de estos iones en el subsuelo en tres apartados: el flujo local (aguas poco evolucionadas y de reciente infiltración); las de flujo intermedio (mayor evolución hidrogeoquímica, tiempo de permanencia con el medio geológico y profundidad); y el flujo regional (tendencia a la mineralización y aumento en los iones analizados). El diagrama de Mifflin para las aguas del manantial se presenta en la Figura 24.

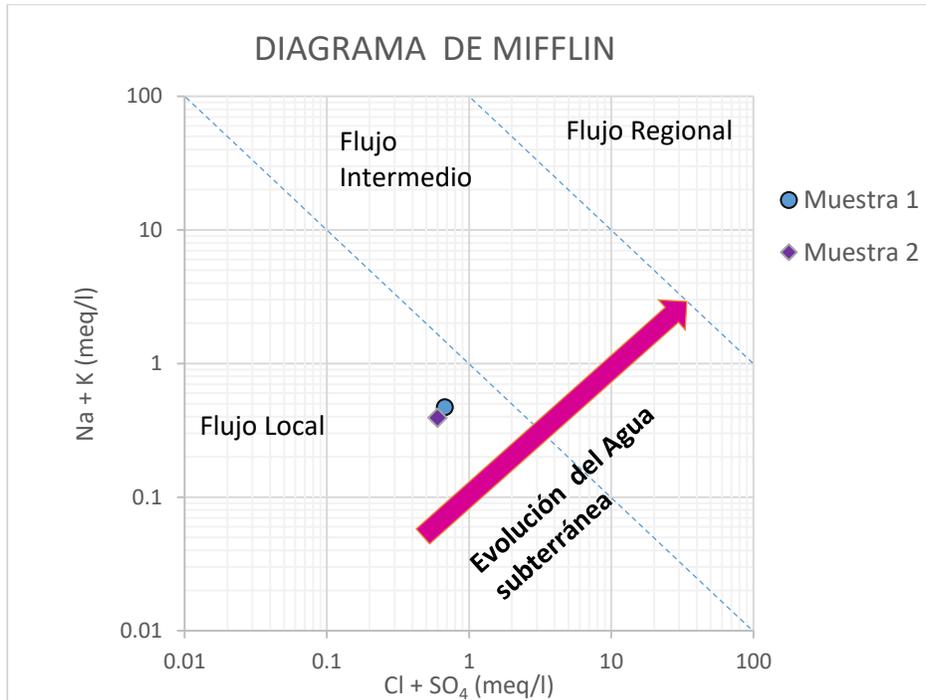


Figura 24. Diagrama de Mifflin

### Diagrama de Gibbs

El diagrama de Gibbs permite observar la concentración de STD con las relaciones de iones  $Na^+/(Na^{++}Ca^{2+})$  y  $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$  en mg/l e identificar los procesos dominantes que ocurren en la química del agua en el subsuelo: evaporación-cristalización (precipitación de minerales), interacción agua-roca (disolución de materiales) y precipitación meteórica (dilución). Con objeto de reconocer el proceso dominante en las aguas del manantial, se empleó este diagrama con las relaciones de los parámetros fisicoquímicos mencionados, que se pueden observar en la Figura 25.

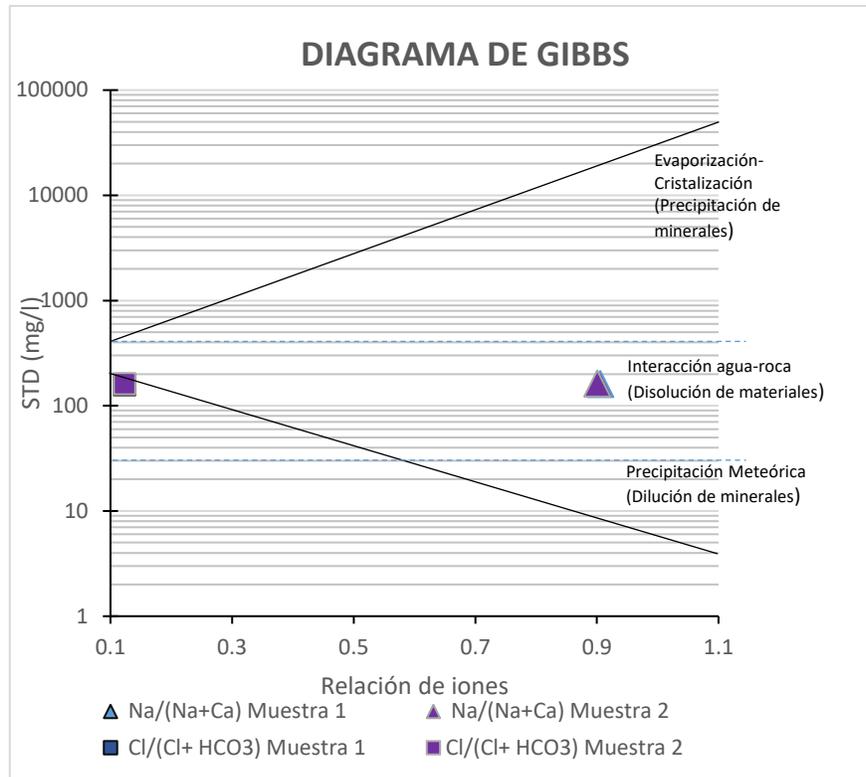


Figura 25. Diagrama de Gibbs

Los diagramas anteriormente presentados aportaron la siguiente información:

De acuerdo con el diagrama de Piper (Figura 23), el agua del manantial se asocia a la facie bicarbonatada magnésica-cálcica: presenta una mayor concentración por parte del ion bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), que actúa como su anión principal y, en menor medida, los cationes Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup>. Las concentraciones de estos iones podrían sugerir su origen y el tipo de material por el que circula; en este tipo de agua predomina el ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> que proviene generalmente de las aguas meteóricas, pero también de suelos ricos en carbonatos (Kresic, 2006). Además, conforme la secuencia de Chebotarev (1955) suele ser ion principal en zonas de recarga. De una manera similar al tipo de agua definido para el manantial, a cierta parte de las aguas subterráneas de la periferia de la Cuenca de México, principalmente en zonas montañosas y áreas de recarga reconocidas, se les considera del tipo magnésico-bicarbonatada (Palma et al., 2022).

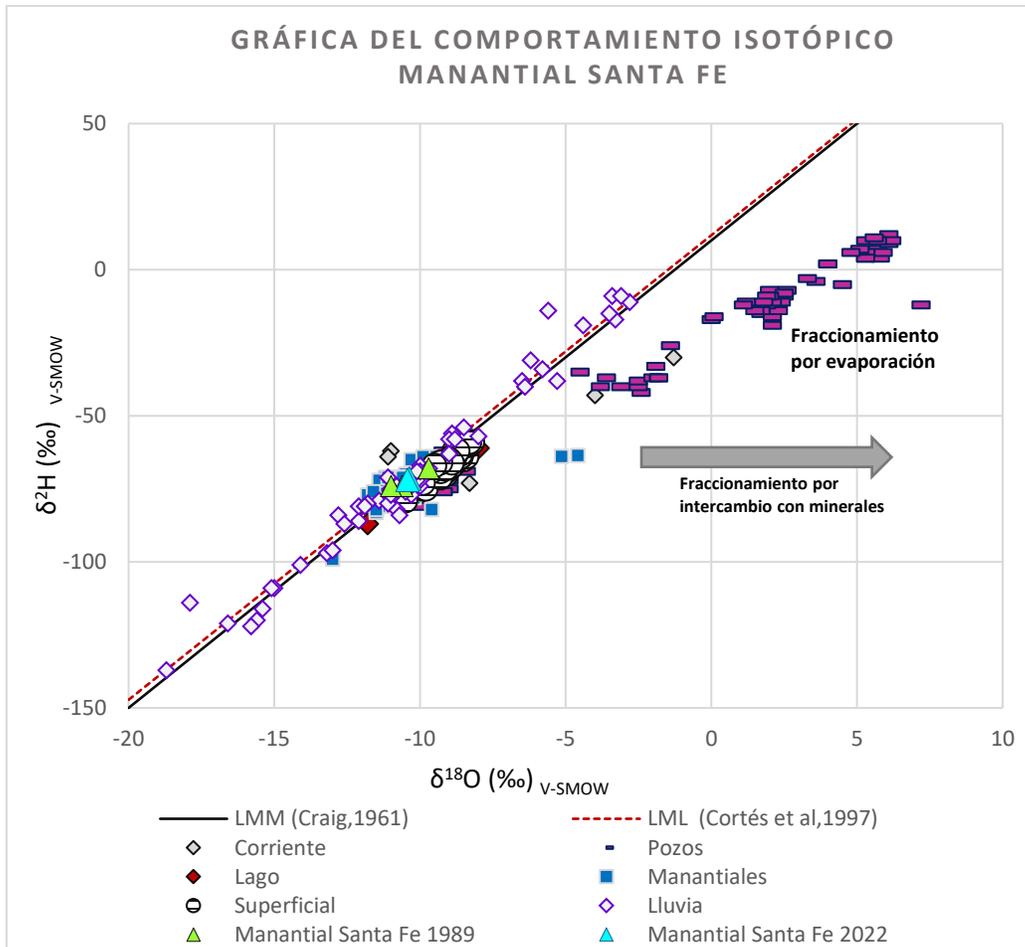
Por otra parte, en cuanto al sistema de flujo, se observa que el agua del manantial se asocia a un flujo local (Figura 24), Miffilin (1968) menciona que las aguas subterráneas definidas como flujos locales corresponden a aguas de reciente infiltración y poco evolucionadas; por lo que presentan una poca evolución en la

concentración de los iones mayoritarios. De la misma manera los parámetros fisicoquímicos medidos en campo, como ya se había mencionado, se relacionaron con los valores de un sistema de flujo local. Lo anterior, también se vincula con el tipo de agua anteriormente definida (Figura 23), la familia bicarbonatada es característica de aguas de reciente infiltración y, en consecuencia, con recorridos cortos en el subsuelo, donde su ion principal es  $\text{HCO}_3^-$  (Chebotarev, 1955; Freeze & Cherry, 1979). En adición, en el diagrama de Gibbs (Figura 25) se puede apreciar como las relaciones de STD con los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , se ubican el proceso de interacción agua-roca, lo que sugiere que el material por donde circula el agua está en disolución, además, este proceso suele ocurrir en flujos de tipo local (González-Abraham et al., 2012).

#### 4.1.2 Isotopía

Para complementar el análisis hidrogeoquímico, en este estudio se utilizaron los isótopos estables del agua, hidrógeno (Deuterio) y del oxígeno (Oxígeno-18), son muy útiles para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterráneas y distinguir aguas con una composición química similar, ya que son trazadores ideales porque son parte de la molécula de agua y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson et al., 2006). En consecuencia, permite identificar el origen del agua subterránea; durante el ciclo hidrológico ocurre fraccionamiento isotópico que produce en cada fase una firma isotópica distinta, esta última se mantiene en el subsuelo mientras no esté expuesta a temperaturas altas (Gat & Gonfiantini, 1981)

Los valores obtenidos de las concentraciones isotópicas, en este estudio para las dos muestras son -10.37 y -10.43 respecto al Oxígeno-18 [ $\delta_{18}\text{O}$  (‰)]; -71.46 y -71.92 para Deuterio [ $\delta_2\text{H}$  (‰)]. Sin embargo, para interpretar adecuadamente los resultados de las relaciones isotópicas de las aguas subterráneas, es preciso tener parámetros de referencia como la Línea Meteórica Mundial (LMM), o bien la Línea Meteórica Local (LML) (Valenzuela et al., 2013). Por lo tanto, se utilizó como referencia la LMM (Craig, 1961) y la LML (A. Cortés & Farvolden, 1989) representadas por las ecuaciones  $\delta_2\text{H} = 7.95 \delta_{18}\text{O} + 11.77$  y  $\delta_2\text{H} = 7.95 \delta_{18}\text{O} + 11.03$  respectivamente, en conjunto con otros tipos de agua pertenecientes a la región (agua de lluvia, pozos, lagos, superficial, etc.) Figura 26.



**Figura 26.** Gráfica de comportamiento isotópico Manantial Santa Fe Modificado de Cortés et al., (1997)

De acuerdo con la Figura 26 las concentraciones isotópicas del manantial, tanto en esta investigación como las recolectadas por Cortés y Farvolden (1989) se ubican sobre la línea meteórica local; estas concentraciones se agrupan en conjunto con algunas de otros manantiales a las pertenecientes a lluvia, lo que también sugiere el agua del manantial Santa Fe proviene de las precipitaciones meteóricas.

Debido a que las firmas isotópicas locales han sido previamente analizadas en la región, Cortés y Durazo (2001) observaron la relación entre las concentraciones del Oxígeno-18 en la precipitación y su variación con la altitud topográfica dentro de la Cuenca de México (donde se encuentra la zona de estudio). Esta variación no es más que un resultado del fraccionamiento isotópico; ya que a medida que aumenta la altitud y las precipitaciones los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  van disminuyendo (Dansgaard, 1954). Con base lo anterior, propusieron la ecuación que representa el gradiente entre  $\delta^{18}\text{O}$  y la altitud:

$$\delta_{18}O = -2.13(Z \text{ km}) - 3.2 \quad (1)$$

Esta ecuación se utilizó para calcular la altura de recarga probable para el manantial Santa Fe, por medio de los valores de  $\delta_{18}O$  obtenidos en este trabajo y en Cortés et al. (1989), a fin de identificar alguna zona de recarga. Los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Altura probable de recarga. Cortés et al, (1989).

$O^{-18}$	Altura probable de recarga (m.s.n.m)
-10.6*	3,474.00
-9.7*	3,052.00
-11*	3,662.00
-10.37	3,366.00
-10.43	3,394.00

De acuerdo con los resultados de altitud probable de recarga para el manantial, que notablemente rebasan los 3,000.0 m.s.n.m. (recordando que el manantial Santa Fe descarga alrededor de los 2400.00 m.s.n.m.), la recarga del aprovechamiento tendría lugar en zonas considerablemente altas, pues las alturas similares y cercanas a el manantial tienen presencia hacia el poniente, en la Sierra de Las Cruces, zona con precipitaciones significativas y la segunda en importancia a nivel recarga.

#### 4.4. Calidad

Dado que las aguas del aprovechamiento tienen como fin el uso humano, es necesario que exista un constante monitoreo para que su composición cumpla con los determinados parámetros de calidad. Esto es posible mediante el análisis de su composición química, que aparte de ser una variable descriptora elemental del medio hídrico, es también una evidencia de su calidad (Ministerio de Medio Ambiente, 2000). Por esta razón, a través de los parámetros fisicoquímicos

obtenidos previamente, se realizó una evaluación de la calidad de las aguas del manantial.

Una forma sencilla de evaluar la calidad del agua potable es mediante las pautas de control o límites permisibles vigentes en ciertos parámetros, empleados por distintos organismos que, generalmente son los encargados de su administración. Otra forma de evaluar es mediante índices de calidad de agua (ICA o WQI), que también por medio de un grupo de parámetros, que se consideran reflectores de su calidad; permiten clasificar y englobar su calidad en un solo valor general (Aly et al., 2015). Las evaluaciones mencionadas se realizan con el objetivo de determinar si el agua es adecuada para el uso que se tiene destinado y/o identificar alguna alteración por contaminación. Además, por medio de estas evaluaciones también se pueden disponer medidas con fin de corregir, o bien menguar el efecto de los contaminantes existentes, reconocer fuentes de contaminación y zonas vulnerables para el agua subterránea que es utilizada como agua potable.

En este estudio para evaluar la calidad del agua del manantial Santa Fe, se tomó referencia comparativa la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua” y un Índice de Calidad de Agua. La primera expone las concentraciones recomendadas para que los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se encuentren dentro del límite permisible para el uso y consumo humano. En el caso del segundo, para estimar el valor de WQI (Water Quality Index) se utilizó la metodología empleada por Ramakrishnaiah et al. (2009), la cual tiene como base la técnica de índices aritméticos ponderados (Brown et al., 1972) y los valores de referencia o límites permisibles de los parámetros evaluadores, que pueden ser ajustados a diferentes normativas (Gil Marin et al., 2019; Monroy, 2022). De modo que el valor de WQI se puede calcular de la siguiente manera:

Se asigna un peso a cada parámetro ( $w_i$ ), de acuerdo con su relevancia (valores entre 1-5), para obtener un peso relativo (ponderado entre 0 y 1) para cada parámetro ( $W_i$ ):

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Por consiguiente, se calcula un índice de referencia para cada parámetro ( $q_i$ ), que es el resultado de la división de su respectiva concentración ( $c_i$ ) entre un valor de referencia de calidad o límite permisible ( $r_i$ ) que es multiplicado por 100:

$$q_i = \frac{c_i}{r_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Consecutivamente, se obtiene para cada parámetro un valor de referencia de calidad ( $Vr_i$ ) que es el producto de su peso relativo ( $W_i$ ) y su índice de referencia ( $q_i$ ):

$$Vr_i = W_i \cdot q_i \quad (4)$$

De tal forma que la sumatoria de los valores de referencia  $Vr_i$ , es igual al valor de WQI para cada muestra:

$$WQI = \sum_{i=1}^n Vr_i \quad (5)$$

Finalmente, para categorizar los valores estimados de WQI, se utilizan cinco rangos de acuerdo con Ramakrishnaiah et al. (2009), expuestos en la Tabla 2.

**Tabla 2 .** Clasificación para IWQ.  
Fuente: Ramakrishnaiah et al. 2009

Valor de WQI	Calidad del agua
<50	Excelente
50-100	Buena
100-200	Pobre
200-300	Muy pobre
>300	No recomendable para consumo humano

A fin de comparar los parámetros fisicoquímicos y estimar los valores de WQI para las dos muestras obtenidas del manantial, se utilizaron los siguientes 18 parámetros: pH, sólidos totales disueltos, alcalinidad total, cloruros, sulfatos, nitratos, zinc total, magnesio total, hierro total, potasio total, turbiedad, sodio total, arsénico total, bario total, cromo hexavalente, conductividad eléctrica y fluoruros. Mientras que los valores de referencia se modificaron de acuerdo con los límites permisibles de la norma NOM-127-SSA1-2021.

Respecto a la comparación de los parámetros ya mencionados con la norma NOM-127-SSA1-2021, ningún parámetro superó su respectivo límite permisible de referencia. Cabe destacar que en las dos muestras la concentración del ion nitrato ( $NO_3^-$ ), parámetro que es relevante para identificar contaminación (OMS, 2011), no

sobrepasó la norma. Por otra parte, los valores estimados de WQI: 21.71 y 21.93; para la muestra 1 y muestra 2 respectivamente, permiten valorar las aguas del manantial con una calidad excelente.

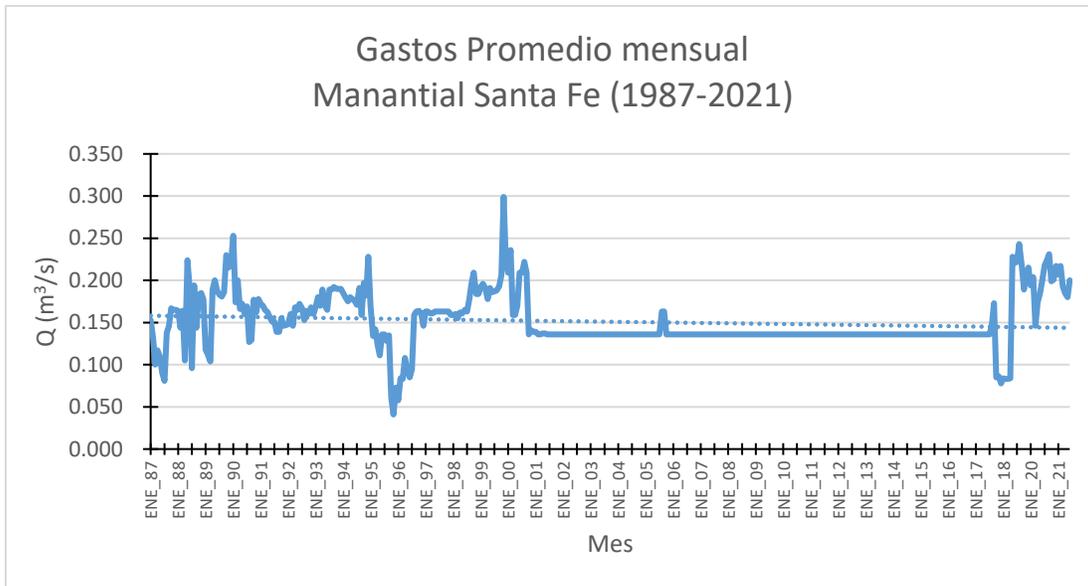
Los resultados anteriores de índice de calidad y la comparación de los parámetros fisicoquímicos que se consideraron evaluadores de su calidad, indican que el agua del manantial a pesar de descargar en suelo donde persisten las actividades antropogénicas, sigue siendo apta para el uso y consumo humano.

#### **4.5. Gastos Históricos Aprovechados**

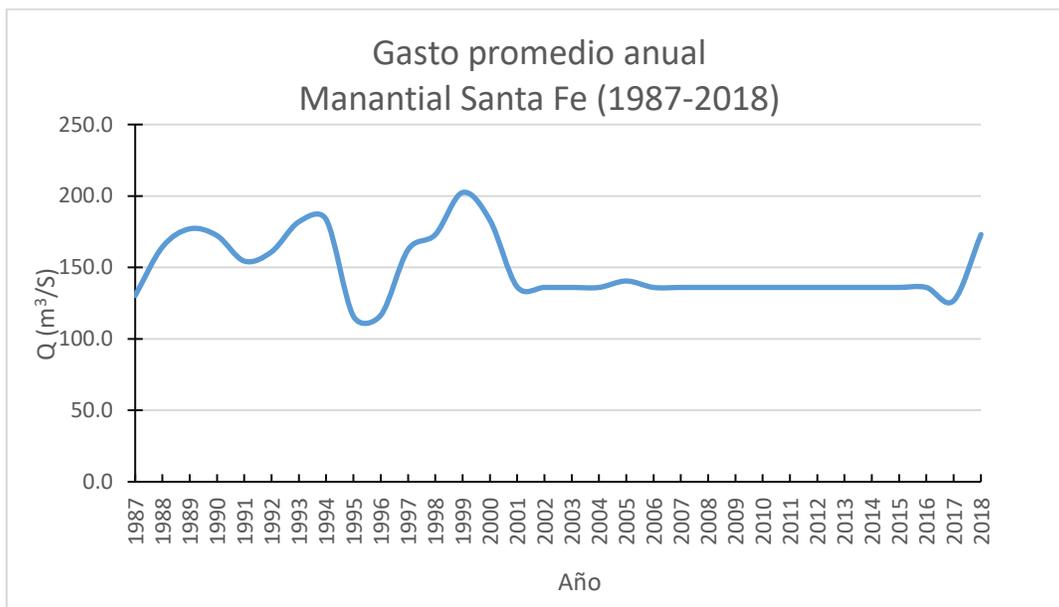
El manantial Santa Fe, como se ha mencionado anteriormente, ha sido una importante fuente de abastecimiento de agua potable para varias zonas de la Ciudad de México, que desde antes de la colonia subsanaba las necesidades de la población, y lo ha seguido haciendo durante varios siglos. Simultáneamente han existido cambios importantes en la ciudad y, por ende, cerca el manantial y dado éste se encuentra asociado a un flujo subterráneo local, que se distingue por la influencia en su recorrido por factores climáticos y antropogénicos; esta influencia puede reflejarse su caudal (Winter et al., 1998).

Factores antropogénicos como el cambio de uso de suelo, aumento de asentamientos humanos y de diferentes construcciones que han ocurrido principalmente en la periferia del manantial, probablemente han tenido efecto negativo en la recarga del caudal. De la misma manera, se tiene la influencia indudable de los factores climáticos, como las sequías que tienen facultad de menguar el caudal y, las precipitaciones, que producen el efecto contrario y no necesariamente negativo en las aguas del manantial. Debido a la existencia de estos factores que pueden influir o afectar los veneros que afloran dentro de las instalaciones de captación, se analizó la evolución del gasto del manantial a través del tiempo para observar su tendencia o bien, su comportamiento en los últimos años, por medio del registro histórico del gasto promedio mensual que ha sido aprovechado por el SACMEX de 1987 a 2021.

Para este análisis, mediante el registro histórico del promedio mensual que se puede observar en la Figura 27, se pudo evaluar la evolución mensual del gasto aportado por el manantial y obtener un registro continuo de 31 años, que abarca los años de 1987 a 2018, y que permitió analizar con menor incertidumbre el comportamiento del caudal para este periodo (Figura 28).



**Figura 27.** Comportamiento del gasto promedio mensual del manantial Santa Fe de 1987-2018 (incluye años no completos).

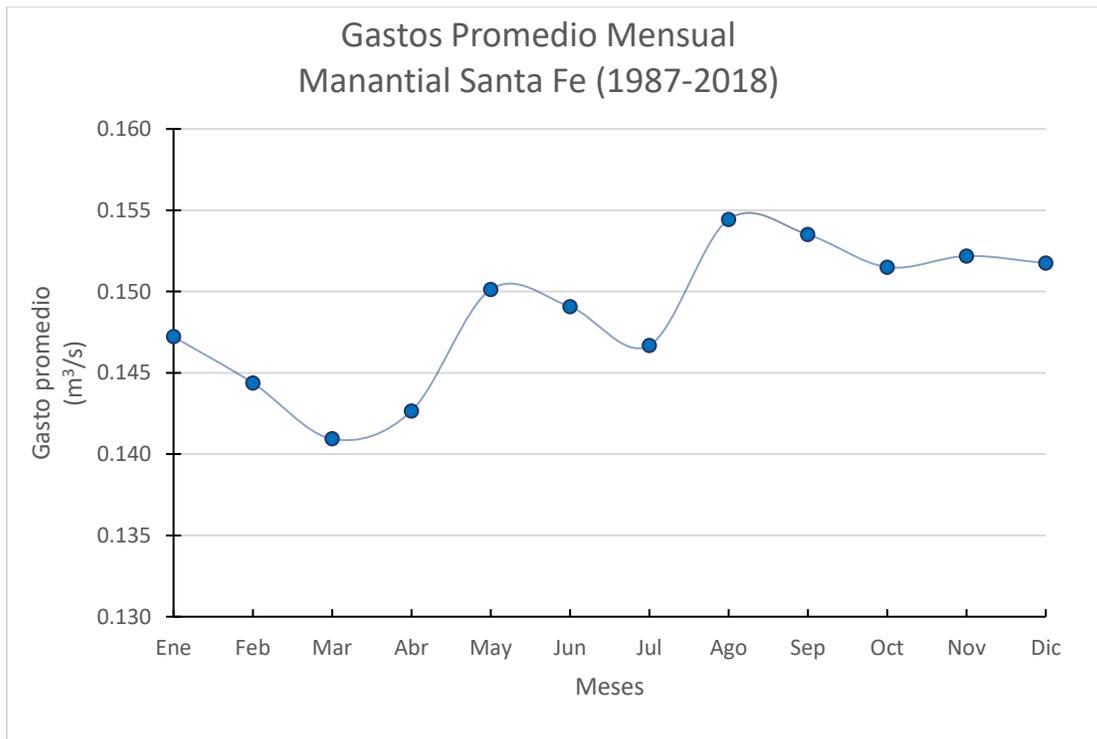


**Figura 28.** Gráfica del gasto promedio anual del manantial Santa Fe para el periodo de 1987-2018

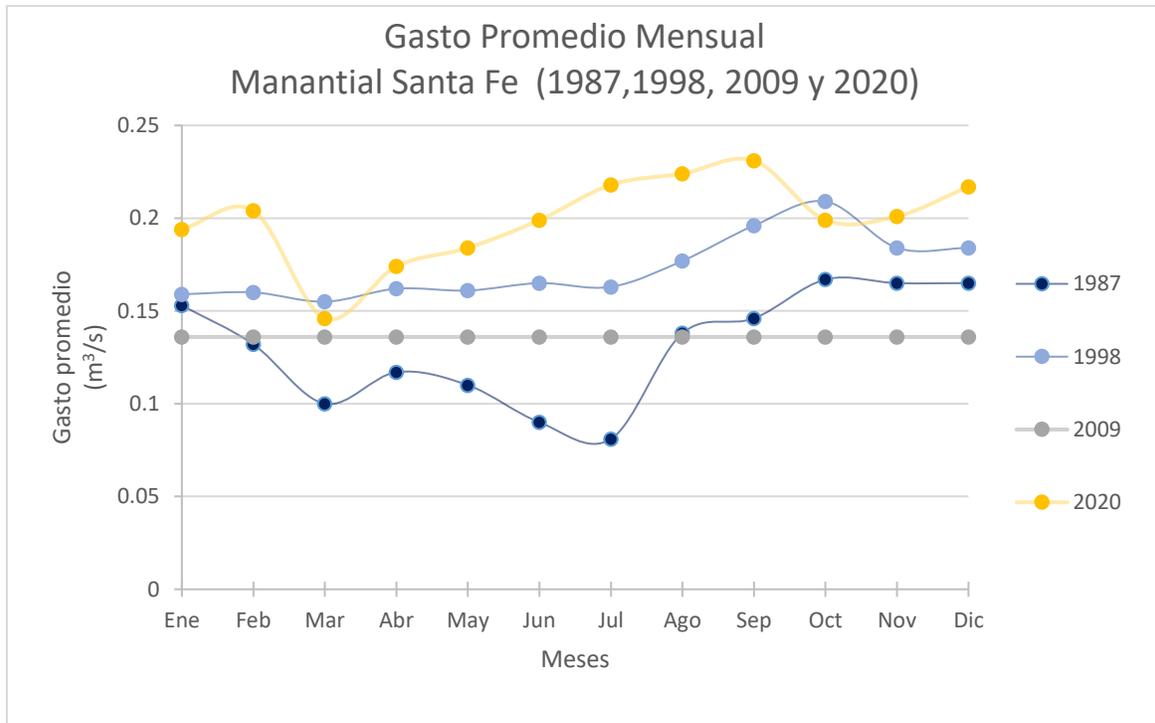
Como se puede observar en la Figura 27, para el periodo de 1987 a 2021, (incluye años no completos) el gasto promedio mensual del manantial se mantuvo constante, con un estimado de  $0.151 \text{ m}^3/\text{s}$ ; es decir 151 l/s. El cual es prácticamente el mismo gasto promedio calculado para la serie anual de 1987-2018 de la Figura 28, con un valor de 149 l/s. No obstante, para el registro continuo mensual de este periodo,

presenta una tendencia a la baja (Figura 28), con una disminución en su caudal de un promedio de 0.08 litros por mes.

Por consiguiente, con objeto de evaluar e identificar alguna tendencia del caudal del manantial durante los meses del año natural, mediante el registro continuo (1987-2018), se estimó un gasto promedio mensual y como complemento, por medio del registro total se tomaron los promedios mensuales de los años de 1987, 1998, 2009, y 2020 (que tienen una periodicidad de 11 años), cuyos comportamientos se pueden observar en las Figuras 29 y 30.



**Figura 29.**Gasto promedio mensual del manantial Santa Fe para 1987-2018



**Figura 30.** Gasto promedio mensual del manantial Santa Fe para los años 1987, 1998, 2009 y 2020.

De acuerdo con la Figura 29, los promedios mensuales del aprovechamiento para el periodo de 1987-2018, presentan un comportamiento característico durante las temporadas de estiaje (noviembre-abril) y precipitación (mayo-octubre) con variaciones en su caudal; en el mes de noviembre se puede observar como el gasto tiende a decrecer entre enero y marzo, siendo en este último donde regularmente presenta sus caudales mínimos; mientras que en los meses de abril y mayo tiende a aumentar el caudal, que se incrementa conforme aumentan las precipitaciones hasta el mes de octubre, teniendo su máximo aporte durante esta temporada. También se puede observar que, generalmente en temporada de estiaje el caudal no disminuye más allá de los 140 l/s y que en temporada de lluvia llega a sobrepasar los 150 l/s, lo que indica que un caudal constante con reacción a las precipitaciones, mismas que producen un excedente en el caudal.

En cuanto a la Figura 30, que contiene los gastos promedios mensuales 1987, 1998, 2009, y 2020, se puede observar que, en su mayoría, los gastos tienen un decrecimiento y aumento del caudal durante ciertos meses del año, aunque con diferencias en sus valores, que se asemeja a el comportamiento observado en la gráfica de promedio mensual de la Figura 29. Por otra parte, cabe señalar que en los registros del año 2009 no presenta esta reacción, sin embargo, su caudal se

mantuvo constante. Además, en el año 2020 hubo un claro aumento en el gasto promedio, con una media anual de 200 l/s (que se mantuvo también como promedio mensual en la primera mitad del año 2021), que es un 33% más del gasto promedio calculado para el periodo de 1987-2018, lo cual es una importante aportación extra por parte del manantial.

Si bien el manantial ha presentado disminución y aumento durante su aprovechamiento, principalmente ha sido constante en contribución, el SACMEX reporta en la actualidad un aporte de caudales importantes; ya que en temporada de estiaje llega a suministrar por gravedad 25 l/s a las colonias: El Capulín y Liberales de 1857 a través de los tanques Capulín I y II; asimismo por medio de los tanques Fabriquita hace lo propio con las colonias Cove, Bellavista y Lomas de Bezares, entregando un promedio de 20 l/s. Finalmente por bombeo 20 l/s al Pueblo de Santa Fe; Pueblo Nuevo y Lomas Altas, siendo en estas últimas su única fuente de abastecimiento. En adición, la zona militar también se ve beneficiada con las aguas de este manantial, al recibir por gravedad parte de los caudales que cruzan por sus instalaciones, con un gasto de 65 l/s.

Los caudales mencionados anteriormente, podrían clasificarse como las aportaciones base del manantial, lo cual representa el abastecimiento de casi 65,000 personas, considerando una dotación de 200 litros por día por habitante. Esto se corrobora con los registros históricos de la última década del aprovechamiento, que estiman una producción promedio anual de 150 l/s, que es un 20% mayor al de su aportación base. Con lo anterior, se clarifica la importante contribución del manantial Santa Fe; que suministra diariamente un caudal de buena calidad a una zona donde, si no es debido a este recurso, habría dificultades para proveer agua potable.

### **4.6. Piezometría**

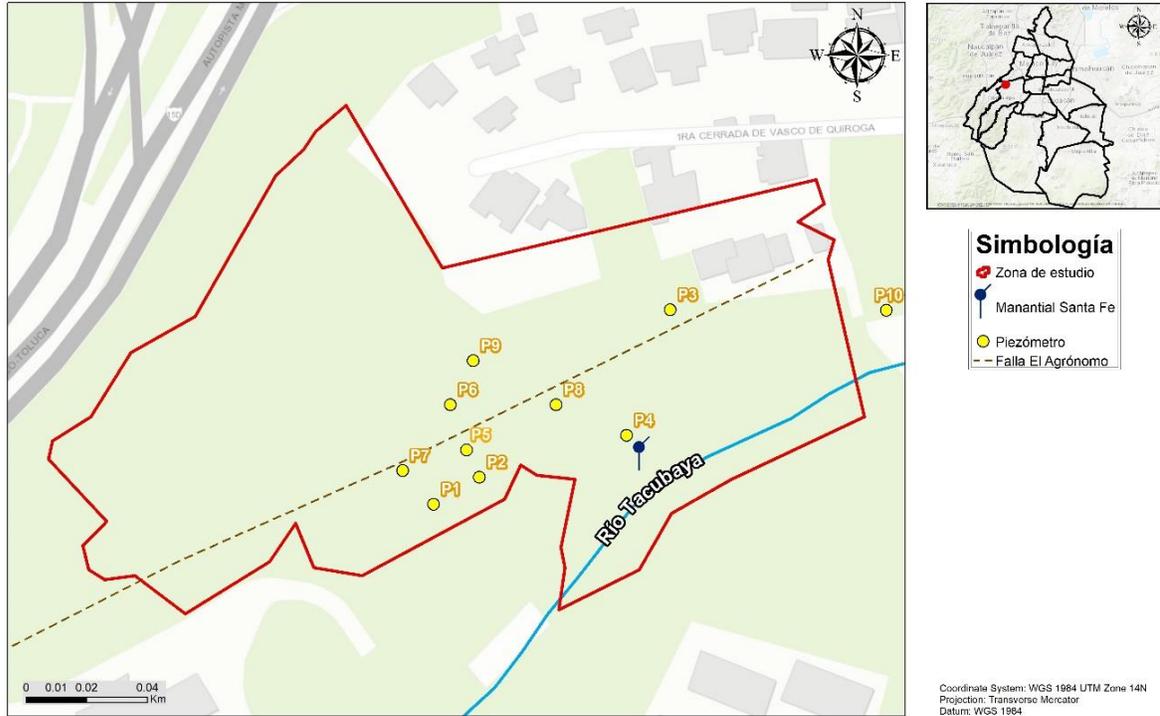
Para la comprensión y óptima gestión del agua subterránea es importante contar con mediciones piezométricas, ya que por medio de estas es posible estimar: cargas potenciométricas, niveles estáticos y freáticos, abatimientos y si se cuenta con registros, evaluar sus cambios a través del tiempo. Además, mediante estos datos es posible realizar mapas que permiten determinar la dirección del flujo del agua subterránea (Karlovic et al., 2021), el cual es importante al momento de inferir áreas de recarga o la dirección que podrían seguir agentes contaminantes una vez dentro del nivel freático de un acuífero (EPA, 2002). Por lo tanto, para entender cómo se comporta el agua que emerge en los veneros del manantial Santa Fe, se utilizó la

información de algunos piezómetros que se encuentran en el predio de captación del manantial.

Dentro del predio se encuentran varios piezómetros, cerca de los afluentes en el área de captación, que fueron colocados para monitorear el nivel estático de manera local. En la Tabla 3, se presentan las observaciones piezométricas registradas para el año 2018 de nueve piezómetros y en la Figura 31, se muestra la distribución espacial de los mismos dentro del predio.

**Tabla 3** Observaciones piezométricas en el predio del manantial 2018

<b>Piezómetro</b>	<b>E.N.E (2018)</b>
P1	2405.29
P2	2405.38
P3	2405.03
P4	2405.84
P5	2407.45
P6	2408.41
P7	2407.79
P8	2406.12
P9	2398.37



**Figura 31** Distribución espacial de los piezómetros.

Como se puede apreciar en la figura anterior, las observaciones registradas corresponden a la parte central del predio, alrededor de los afluentes; cerca de donde se encuentran las cajas de infiltración que captan los veneros de la parte central y unos metros hacia el poniente que es donde se captura el venero que descarga a mayor altitud.

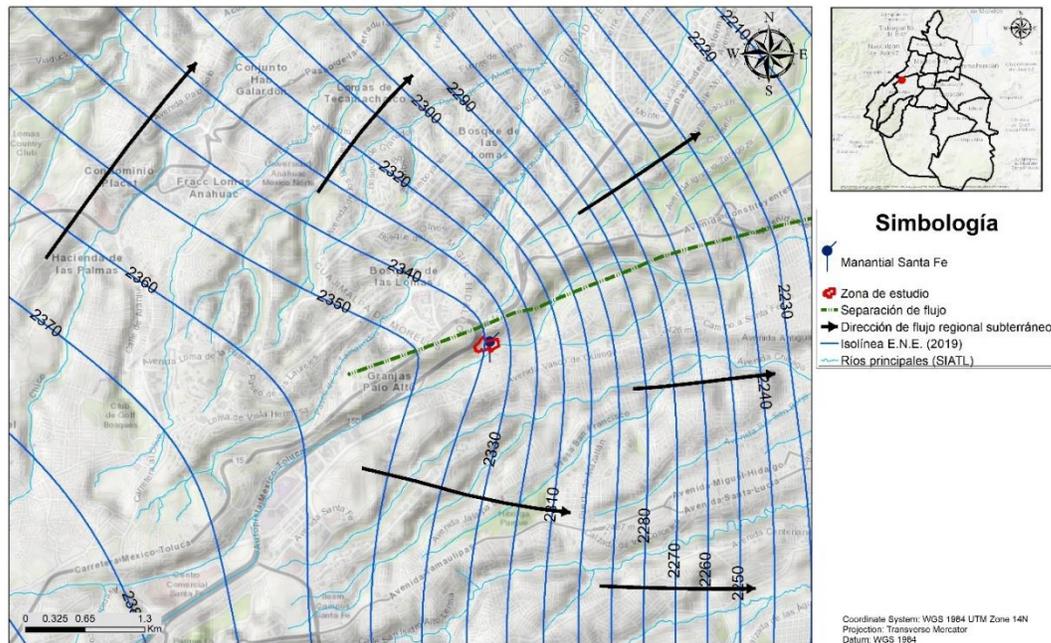
Por consiguiente, se realizó un mapa del nivel estático mediante las observaciones piezométricas y su ubicación, a fin de analizar los niveles en la zona donde se captan los veneros y la dirección del flujo; ya que permite inferir el comportamiento del agua en los estratos superiores y como propicia su descarga en la superficie. Este mapa se elaboró con el método de interpolación de Kriging por medio del software Surfer® y se puede observar en la Figura 32.



**Figura 32** Dirección del flujo subterráneo en el manantial.

De acuerdo con la figura anterior, el nivel más alto se encuentra muy cerca de donde aflora el venero que se localiza hacia el poniente de la parte central del predio y, conforme desciende la topografía similarmente lo hace el nivel estático. Por lo que una parte del flujo podría seguir la tendencia de la topografía; hacia la parte más baja de la barranca que es donde se localiza el cauce del río Tacubaya y hacia el este, a la parte baja de la cuenca, siguiendo una dirección paralela al cauce del río. Es importante recalcar que las direcciones del flujo estimadas en el mapa, son representativas solo del área local que abarcan los piezómetros de monitoreo. En el caso de un flujo local, la dirección que el flujo suele tomar es la de la topografía de la superficie (Pérez et al., 2018). Sin embargo, la dirección del flujo también depende de las características hidrogeológicas del medio; ya que, si este presenta heterogeneidad, la dirección puede cambiar al transitar de un medio a otro que tenga distinta permeabilidad (Sánchez, 2017).

Para complementar este análisis en la Figura 33 se muestra el nivel estático del AZMCD en la zona de estudio, estos niveles fueron estimados para el año 2019 mediante la información piezométrica de los pozos que abastecen al SACMEX.



**Figura 33** Flujo regional.

Como se puede observar, los valores de nivel estático en la zona de estudio, podrían encontrarse aproximadamente a 80-70 metros de profundidad de donde descargan los veneros del manantial Santa Fe. Dado que es una distancia considerable, esto también indica que se trata de un flujo independiente de este acuífero.

Así mismo, se puede apreciar ciertos comportamientos del nivel estático del AZMCD en cuanto a la topografía de la cuenca: existe un aumento hacia las partes altas, en el caso del poniente se refleja en la Sierra de Las Cruces; mientras que el nivel disminuye conforme lo hace topografía, hacia la parte baja de la cuenca. Cabe señalar que el primer comportamiento también representa la conectividad hidráulica entre las formaciones Las Cruces y Tarango (donde se localiza el manantial, dado que en esa zona el acuífero es libre y se presentan en mayor cantidad las precipitaciones; es la segunda en importancia a nivel recarga para este acuífero.

Aunque el agua subterránea puede presentar modificaciones generalmente en su curso por la topografía (flujo local) y la permeabilidad del medio en el que circula, es importante considerar que las fallas geológicas presentes en la zona pueden retener y/o cambiar el sentido del flujo (Caine et al., 1996; Vélez, 1999). Como se mencionó anteriormente, el pie de monte es una zona que contiene fallas y sus aguas superficiales podrían estar condicionadas por estas, por lo que flujo de agua que interactúa en los alrededores del manantial en la subsuperficie, también podría tener una importante influencia de las fallas en su conducción y dirección en los estratos superiores hacia la barranca donde aflora el manantial.

#### 4.7. Perfiles

Para definir las características hidrogeológicas del manantial Santa Fe, que se distingue por aportar un caudal constante y ha sido utilizado para solventar el consumo de agua potable, se ha tomado en cuenta la información recopilada del área de estudio y del manantial (geología, hidroestratigrafía, hidrogeoquímica, caudales aprovechados y piezometría), ya expuesta anteriormente. Por consiguiente, mediante su correlación con los datos obtenidos en campo se ha propuesto el comportamiento hidrogeológico del afluyente y como complemento, perfiles hidrogeológicos para el sitio de estudio.

Con la finalidad de plantear las condiciones que contribuyen al afloramiento del manantial en la barranca, un dato primordial es la geología de la zona de estudio. Debido a que no se cuenta con un estudio geológico específico del sitio donde se localizan los veneros, el comportamiento hidrológico planteado toma en cuenta las principales unidades litológicas de la Formación Tarango en el pie de monte y sus propiedades hidrogeológicas.

Como se mencionó antes, el pie de monte se sitúa en una parte considerada “libre” del acuífero superior, en esta condición la recarga puede ocurrir por medio de la infiltración vertical en la zona no saturada, a través de estratos inferiores o el flujo subterráneo lateral (Fetter, 2001). Aunado a esto, a la Formación Tarango se le atribuye una permeabilidad de media a alta, pero que presenta variabilidad a causa de la heterogeneidad de materiales que la constituyen.

En los estratos superiores de la Formación Tarango se encuentran principalmente materiales finos y granulares pocos consolidados, que se distinguen por ser muy permeables, como las “arenas azules”. A través de los cuales el agua puede infiltrarse y descender, pero al encontrarse con otros materiales de menos permeabilidad, el flujo vertical puede dejar de descender; de modo que un cambio significativo de permeabilidad en esta dirección, producirá acumulación de agua. Por lo que se sugiere la existencia de una capa de materiales impermeables. Donde el agua es retenida y acumulada en estratos superiores (a la capa impermeable), con materiales de mayor porosidad y, finalmente, desborda a través de estratos con mayor permeabilidad en forma de manantial.

Cabe señalar que, de las unidades representativas de esta formación, los depósitos fluviales y lahar son los que generalmente se encuentran en las barrancas. Algunos se conforman de una matriz limo-arcillosa que al saturarse pueden tener un comportamiento de acuicludo, en otras palabras; tiene la capacidad almacenar y

retener el agua, pero no tiene la capacidad de transmitirla (Freeze & Cherry, 1979), por lo que se llega a considerar como una unidad “impermeable”.

Sin embargo, aunque el material impermeable impide el paso del agua a los estratos inferiores, el afloramiento de los veneros no se genera en la parte más baja de la cuenca del río, si no en la parte media baja de la ladera norte de esta última, antes de llegar al nivel del cauce. Lo anterior permite inferir poca permeabilidad en las capas adyacentes tanto al sur como al este de los veneros, ya que el flujo lateral posee esa dirección por topografía y gravedad; por lo que la presencia de materiales impermeables o semipermeables son la causa más probable de que el flujo no continúe hacia las partes bajas de la barranca o que genere un tránsito muy lento en esas direcciones.

Para una mejor comprensión del comportamiento del manantial se han propuesto perfiles hidrogeológicos para el sitio de estudio (Figura 34a), a fin de ilustrar la presencia de unidades hidrogeológicas con diferentes permeabilidades. Estos perfiles fueron propuestos con base en la topografía del lugar, el análisis de los niveles piezométricos, dirección del flujo, gastos aprovechados, así como las características superficiales relevantes reconocidas en campo.

De acuerdo con el registro de gastos del manantial en la temporada de estiaje y precipitación, se observa un incremento del caudal en la temporada de lluvias mientras que en la temporada de estiaje se estabiliza. Lo que sugiere una recarga en una zona inmediata al área de descarga; una capa superior con buen drenaje donde el agua de lluvia se puede infiltrar y llegar a la unidad donde se almacena el agua (Figura 34).

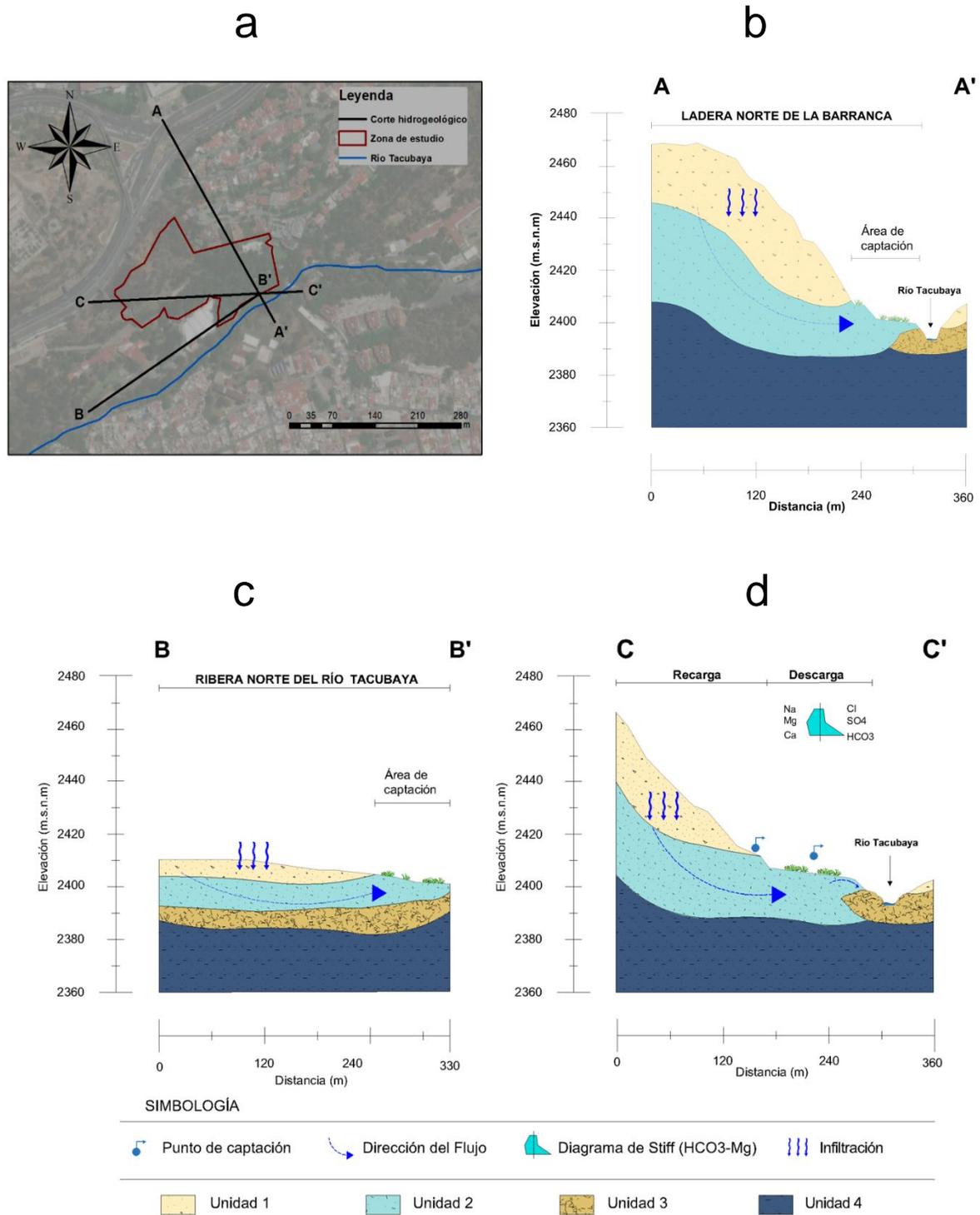


Figura 34 Unidades hidrogeológicas propuestas para el sitio de estudio

Por otra parte, como se mencionó antes la vegetación que se localiza en el área central del predio indica una cercanía importante al nivel freático, ya que se observa un suelo saturado (Figura 14). De la misma manera, el mapa de nivel estático estima que en la parte central el nivel se encuentra cercano a la superficie. Con base a esto, se sugiere que en esta zona se encuentra expuesta o muy cercana a la superficie la unidad donde se almacena el agua (Unidad 2). Esta misma unidad sirve como conducto del flujo subterráneo desde la zona norte (probablemente también desde el poniente) del área de captación, hacia a la parte intermedia baja de la ladera de la barranca, donde ocurre la descarga.

No obstante, debe señalarse que debido a la cercanía de una corriente fluvial al predio de captación y del continuo aporte de materiales arrastrados por río, estos materiales podrían asentarse en las riberas conformando otra unidad (Unidad 3). Además, cabe considerar que el flujo subterráneo continúa su dirección acorde a la topografía, una parte del agua puede llegar al nivel del cauce del río a través de los materiales presentes en la ribera norte (Figura 34d). Mientras que otra parte seguiría un curso paralelo al cauce al poniente hacia la parte baja de la cuenca del río (Figura 34c).

Conforme al comportamiento hidrogeológico expresado, se sugiere la coexistencia de cuatro unidades con cambios significativos de permeabilidad y diferente contribución afloramiento de los veneros:

- Unidad 1: Parte superior del terreno (principalmente en la ladera norte de la barranca), conformada por materiales permeables por donde el agua puede infiltrarse y recargar la Unidad 2.
- Unidad 2: Subyacente a la Unidad 1, constituida por materiales permeables y porosos; donde el agua puede almacenarse. Debido a la dirección de la descarga, se extiende hacia el norte y poniente de la barranca (Figura 34).
- Unidad 3: Riberas del río Tacubaya, conformada por material con muy baja permeabilidad, principalmente en la ribera norte del río, que retiene gran cantidad del flujo lateral antes de que pueda llegar al nivel del cauce o bien, permitiendo un tránsito muy lento hacia el sur y oriente del predio (Figura 34, b y c).
- Unidad 4: Parte inferior de la barranca, capa impermeable o semipermeable de materiales que impiden el paso de flujo de manera vertical; hacia los

estratos inferiores. De manera similar a la Unidad 2, se extiende al norte de la barranca (Figura 34b).

#### 4.1.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Mediante el análisis de la información recopilada, los resultados previamente obtenidos y las características definidas anteriormente, se propone el modelo conceptual para el manantial Santa Fe.

Con base a las concentraciones de los isotopos estables (Deuterio y Oxígeno-18) que caen sobre la LML de la Sierra de Las Cruces y el tipo de agua definida (bicarbonatada magnésica-cálcica) donde el ion  $\text{HCO}_3^-$  domina, al agua que descarga en el manantial se le atribuye un origen meteórico (agua de lluvia).

La concentración de los iones mayoritarios asocia al manantial con un sistema de flujo local, el cual tiene un tránsito en el subsuelo de un periodo corto hasta su descarga en la superficie, donde el proceso hidrogeoquímico dominante es la disolución de minerales (la interacción agua-roca), es decir; se trata de agua de reciente infiltración (poco evolucionada).

Las concentraciones de Oxígeno-18, por medio del gradiente topográfico local, señalan zonas de recarga en altitudes que se localizan en las partes altas de la Sierra de las Cruces (Tabla 1). Debido a la variación las alturas estimadas, el agua puede infiltrarse a diferentes altitudes presentando tránsitos en el subsuelo de diferente duración. En el poniente el acuífero se considera libre y con conexión hidráulica con La Formación Tarango, las aguas infiltradas provenientes de las abundantes precipitaciones en esta parte del suroeste, pueden efectuar su tránsito hasta la barranca donde se encuentra el manantial (a unos 2400 m.s.n.m.). Estos viajes son posiblemente muy influenciados por la topografía del poniente (zona montañosa). De una manera similar, el tránsito de estas aguas puede estar también condicionado por las fallas existentes en el pie de monte. Además, cerca del área de captación manantial, en la barranca, se indica la presencia de fallas.

En las Figuras 35 y 36 se integraron los datos más relevantes de las características descritas anteriormente y que conforman el modelo hidrogeológico conceptual propuesto para el manantial Santa Fe. La Figura 35 ilustra un modelo hidrogeológico conceptual a escala "regional", a causa de que las aguas del manantial presentan un recorrido extenso dentro del sistema de flujo local. Donde se muestra la diferencia entre las alturas probables de recarga y la zona de descarga del manantial, así como la distancia de del tránsito del flujo subterráneo que llega hasta la barranca donde se encuentra el manantial.

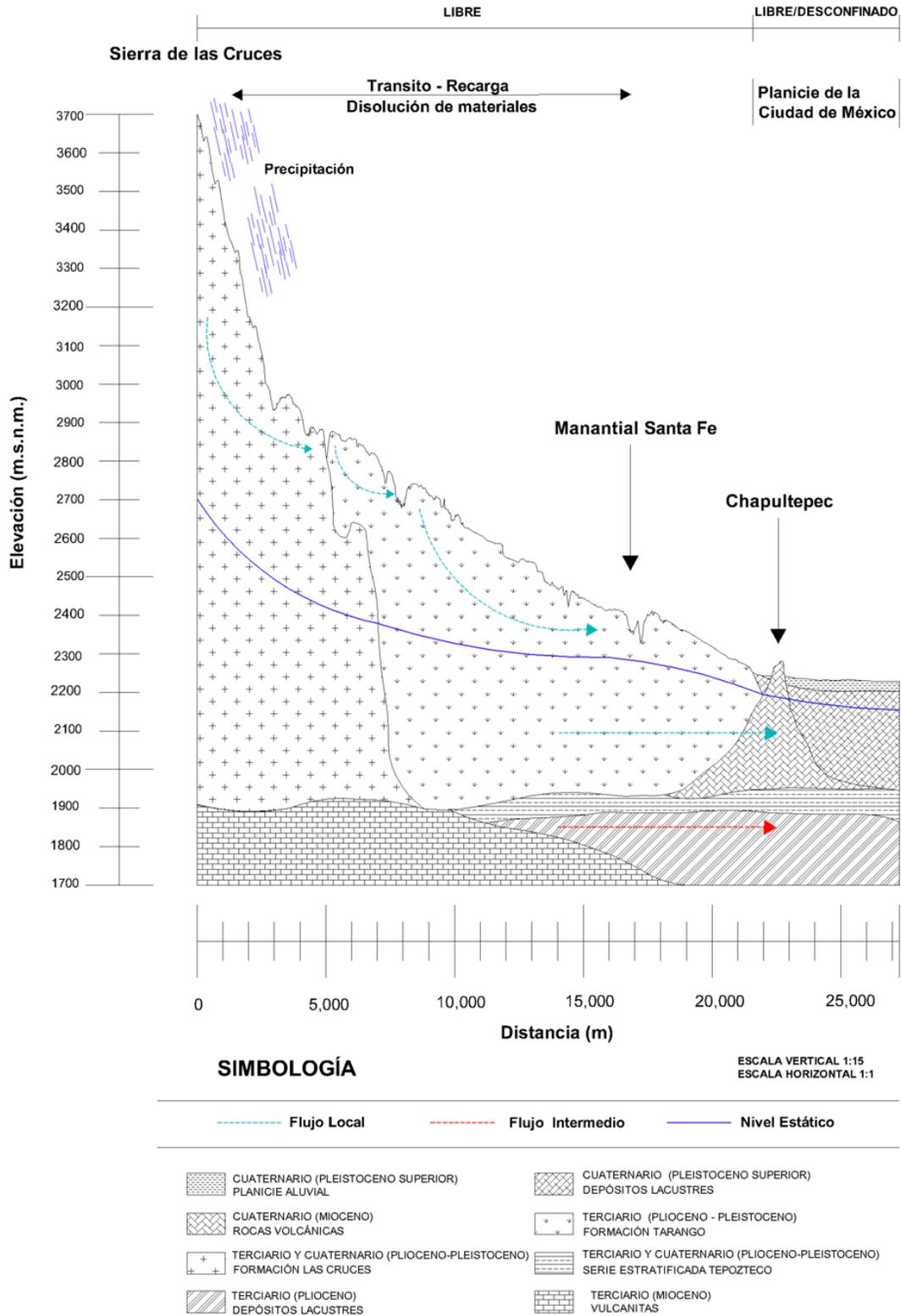


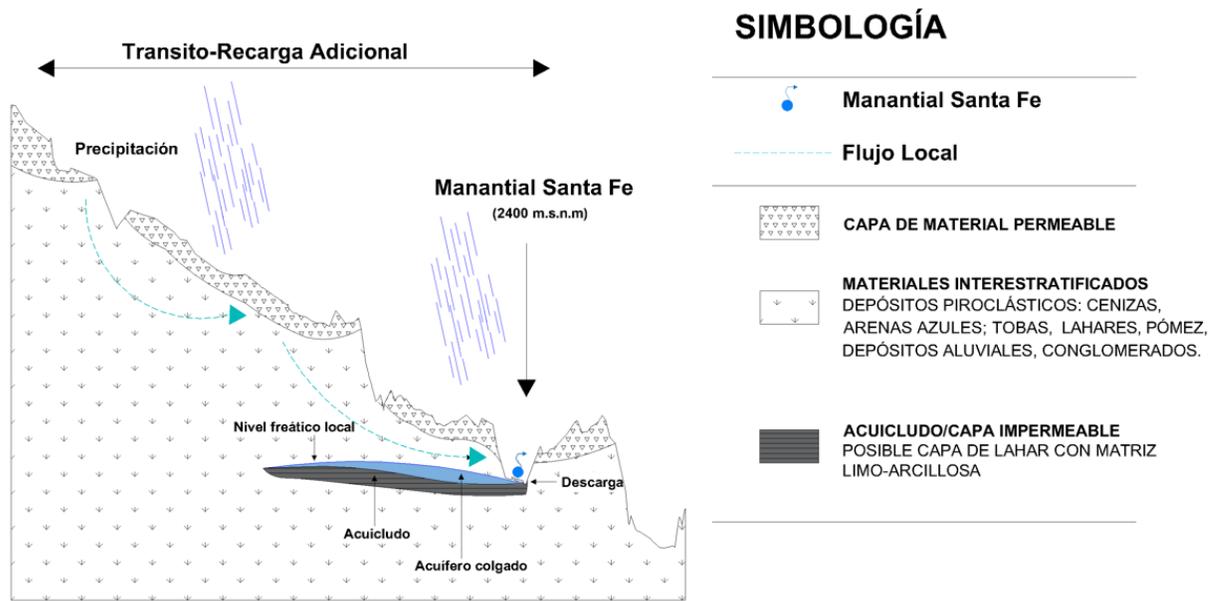
Figura 35. Modelo hidrogeológico conceptual

Por consiguiente, al llegar las aguas a la barranca, debido a las características hidrogeológicas de los materiales presentes (cambios de permeabilidad vertical y horizontal), el agua es retenida, se acumula en gran cantidad y aflora en la superficie como resultado de la presión inducida por la saturación y/o por un cambio de mayor permeabilidad en los materiales que se encuentran en la superficie.

Como se mencionó anteriormente, debido a las características del suelo, las barrancas en el pie de monte son consideradas como zonas de recarga. Ésta última se ve favorecida por los escurrimientos que propicia la topografía del lugar. De modo que durante la temporada de lluvia en los materiales del subsuelo del sitio (permeables), el agua se infiltra y se produce una recarga “adicional” al manantial (Figura 36). El agua infiltrada tiene una repercusión directa en el caudal, que también podría serlo en su composición química, debido a la cercanía con la presencia antrópica.

Por lo tanto, las características anteriormente expuestas, señalan la presencia de una capa de materiales impermeables, con un comportamiento acuicludo, que es la responsable de retener la gran cantidad de agua, generando un nivel freático encima del nivel freático regional (Figura 35 y 36). Dicha capa y el agua almacenada ejercen presión sobre la zona no saturada (unidad superior permeable), que provoca que el flujo salga a la superficie, dichas características corresponden a un manantial de tipo colgado.

Aunque caudal del manantial tiene cierta influencia de las lluvias, su flujo es constante durante el año, lo que permite una contribución base, o bien una descarga base por parte del manantial de cantidad considerable (hasta 130 l/s). De acuerdo con los registros históricos de gastos aprovechados del manantial (1987-2021), el promedio mensual aportado (151 l/s) permite estimar una contribución de más de 4.7 millones de m<sup>3</sup> por año. Lo anterior, aunado a la cantidad de años que el manantial a provisto de agua a la ciudad, indica agua retenida en gran cantidad que fue infiltrada anteriormente, por lo que más que un manantial, se trata de un acuífero colgado “perched aquifer” el cual se ilustra en el mapa hidrogeológico conceptual “local” en la Figura 36.



**Figura 36.**Modelo hidrogeológico local

En este tipo de acuífero la mayor parte del agua, proviene del nivel freático regional (EPA, 1994). De manera que su agua puede presentar recorridos “regionales” más largos dentro del mismo sistema de flujo local y presentar zonas de captura o recarga alejadas de la zona de descarga. Por lo tanto, la zona de captura total para el manantial no se limita a un área cercana o inmediata, si no que se es más extensa; donde el agua encuentra paso por infiltración y dirección hasta la zona donde el flujo emerge.

En resumen, se deduce que el agua subterránea que emana de los veneros en el manantial proviene principalmente de la parte poniente, es decir; de las zonas altas de la Sierra de Las Cruces y el agua “adicional” reflejada en el caudal en tiempo de precipitación, se deriva de la recarga en una zona inmediata y/o aledaña a los veneros del manantial. De modo que, el manantial tiene tanto una zona de captura “regional” como una “local” (zona de influencia directa).

Las zonas de recarga o captura pueden estimarse para algunos aprovechamientos mediante diversos métodos, sin embargo, para definir las adecuadamente es necesario la obtención y uso de sus características hidrogeológicas; de manera que los métodos correspondan a las características primordiales del manantial al cual se le quiere definir dichas zonas.

En el siguiente capítulo se expone la metodología propuesta para definición de las zonas de captura e influencia para el manantial Santa Fe.

## 5 Zona de Influencia y Aportación del Manantial

Se ha convertido en una necesidad esencial proteger las fuentes de agua subterránea, sobre todo aquellas que se utilizan como fuente agua potable, frente a las actividades antropogénicas que puedan atentar contra su calidad, ya que es difícil y costoso revertir el daño causado por contaminantes. Debido a esta situación, para resguardar el recurso subterráneo, varios organismos (principalmente los relacionados con protección de fuentes de agua), autoridades encargadas de su gestión e investigadores han implementado zonas de protección para el agua subterránea (Environment Agency, 2019; EPA, 1998).

La Agencia de Medio Ambiente (2009) ha definido estas zonas de protección como “Zonas de protección de fuente” (SPZs, por sus siglas en inglés), que se refieren aquellas áreas donde las fuentes de agua subterránea están en riesgo a causa de actividades potencialmente contaminantes y sus descargas accidentales. La determinación de tales zonas es principalmente una herramienta para optimizar la gestión del uso de agua subterránea, ya que también funcionan como medida de preservación. Su delimitación tiene como objetivo mantener o mejorar, a medida que sea posible, la calidad y recarga de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea (Moreau et al., 2014); pues al delimitar una zona de protección, consecuentemente se pueden aplicar restricciones de uso de suelo, técnicas de saneamiento en caso de contaminación (Liu et al., 2019) y controlar las actividades antropogénicas cercanas a estas fuentes que propicien su contaminación. Por lo tanto, las actividades de uso de la tierra potencialmente contaminantes están prohibidas o restringidas en las zonas de protección de fuentes y, las restricciones se reducen conforme disminuye su acercamiento a la fuente de agua subterránea (Environment Agency, 2019).

Para la delimitación de estas zonas de protección (SPZs) existen gran cantidad de métodos, que se comprenden desde desarrollos sencillos hasta muy sofisticados (Civita, 2008; Environment Agency, 2019; EPA, 1998; Kreye et al., 1996; Moreau et al., 2014; Paradis et al., 2007). Sin embargo, en su mayoría están enfocados a protección de pozos (donde comúnmente se tiene más información hidrodinámica del acuífero, niveles freáticos regionales, mapas potenciométricos, etc.) y, generalmente, no son directamente aplicables a manantiales (Jensen et al., 1997). Lo anterior se debe a la diversidad de entornos hidrogeológicos en los que se pueden encontrar los manantiales, no obstante, la falta de información sobre los mismos y su ubicación (algunos se encuentran en zonas remotas) son insuficientes

para su aplicación y en ocasiones, la delineación de las zonas de protección no corresponde con su funcionamiento hidrogeológico.

Si bien se han delimitado áreas de protección a manantiales aplicando algunos de esos métodos, debido a que cada manantial cuenta con diferentes particularidades, es de vital importancia el poder caracterizar su entorno hidrogeológico e identificar zonas de protección de manera adecuada y que sea acorde a sus características hidrogeológicas principales.

Como se ha dicho, varios autores hacen hincapié en la importancia de la identificación de las SPZs teniendo como base un modelo hidrogeológico conceptual (Goldscheider et al., 2000; Jensen et al., 1997; Kreye et al., 1996), que permita indagar en el funcionamiento hidrogeológico del afluente y posteriormente, facilite seleccionar el método para su delineación. De igual manera, cabe señalar que, la aplicación de los diferentes métodos que se utilizan para delinear los límites de SPZs depende en gran medida de la interpretación de datos y el modelo conceptual del manantial.

### **5.1 Metodología de delineación de SPZs para el manantial Santa Fe**

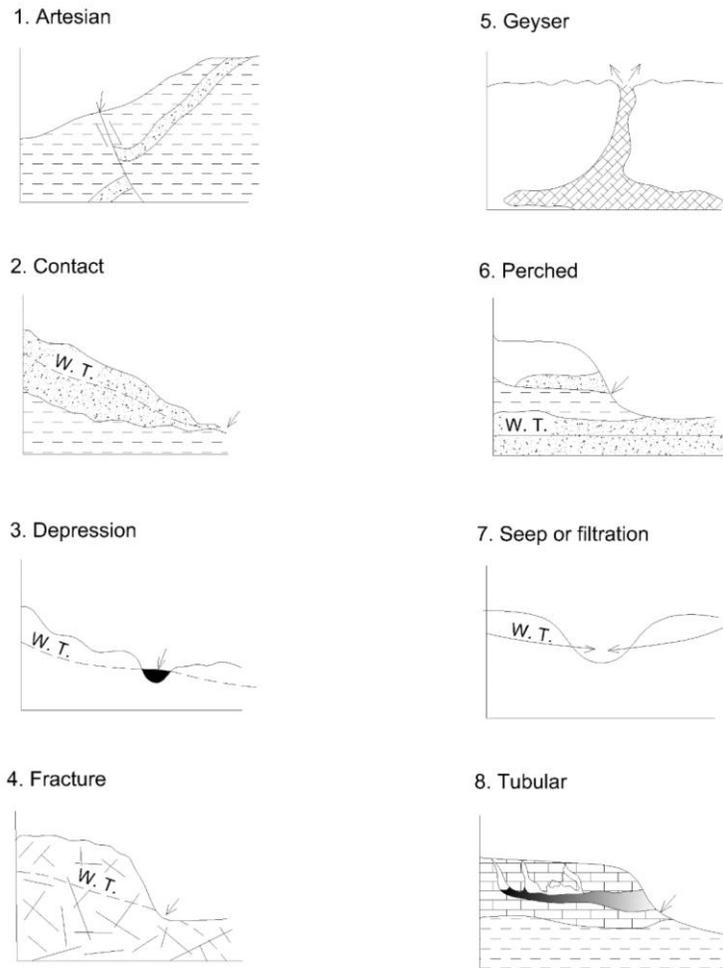
Con base en la información recopilada y estimada sobre el afluente en estudio, se definieron sus características principales y se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual. Este último facilitó la clasificación del manantial en algún tipo según su geología y de tal modo, seleccionar un método práctico para definir las zonas de influencia y aportación (SPZs) con la información disponible y, un menor grado de incertidumbre.

Antes de delimitar las SPZs para el manantial Santa Fe, se consideró principalmente las características obtenidas en el modelo hidrogeológico conceptual de modo que, para este trabajo, la elaboración del modelo para el afluente se considera el primer paso para delimitar las zonas de protección.

Por consiguiente, se clasificó el manantial de acuerdo con la metodología Jensen et al. (1997), donde se determina el tipo de manantial en el aspecto hidrogeológico (Figura 37) y su descarga promedio (Tabla 4). De acuerdo con Kreye et al. (1996), clasificar los manantiales contemplando su geología es una herramienta práctica, ya que ésta gobierna directamente la aparición de manantiales y el flujo de agua que llega a los mismos; por lo que facilita sugerir el medio donde interactúa el agua subterránea y proponer un método de delineación para zonas protección (captura e influencia) acorde a sus propiedades. Por otra parte, la segunda permite clasificar el afluente en un grado de explotación, al medir la cantidad de agua que proporciona (para su uso) y a la vez, se desea proteger.

**Tabla 4.** Clasificación de manantiales con base a su descarga promedio (Meinzer, 1923)

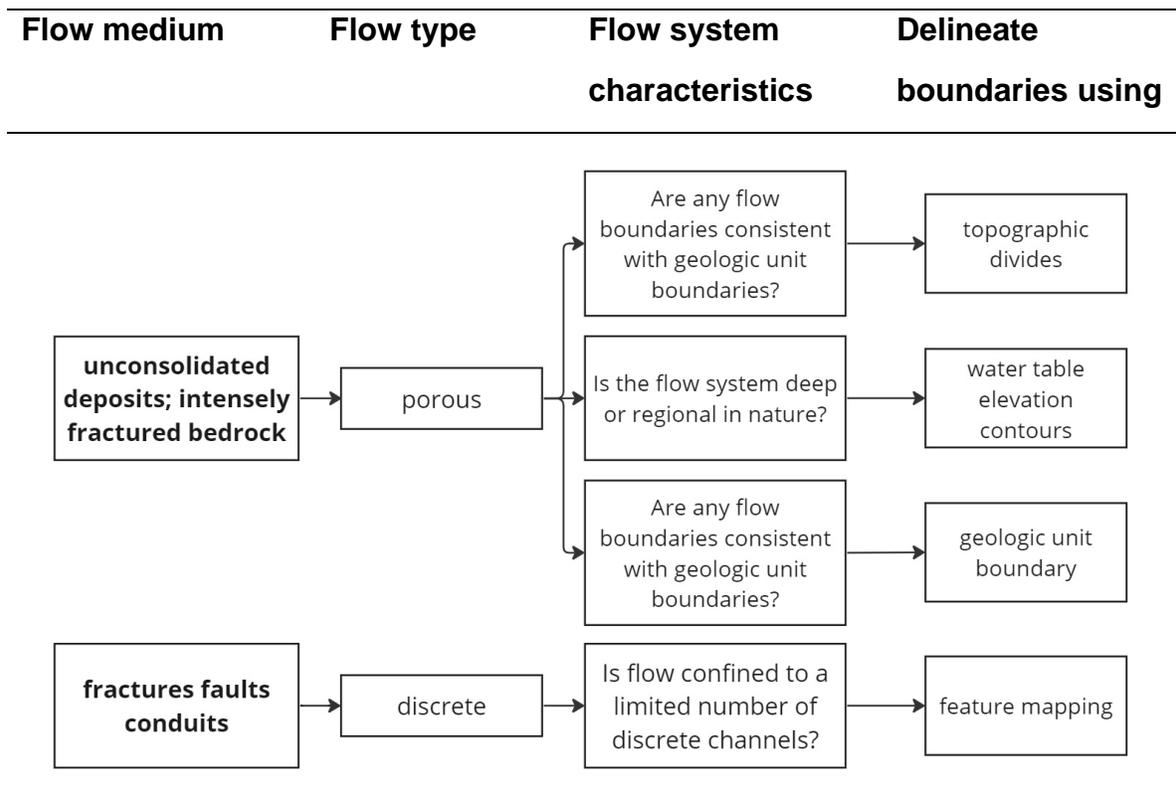
Grado	Descarga promedio (l/min)
1ro	>170,000
2do	17, 000 -170,000
3ro	1700 -17,000
4to	380 -1700
5to	38-380
6to	3.8 -38
7mo	0.5 -3.8
8to	<0.5



**Figura 37.** Tipos de manantiales de acuerdo con sus características hidrogeológicas (Modificado de Baker and Foulk, 1975)

El manantial Santa Fe se puede en clasificar hidrogeológicamente como un manantial de tipo colgado (Sección 4.1.3) y, conforme a la información de los caudales históricos aprovechados, su explotación es de tercer grado; con un caudal promedio de 9,060 l/min que suministra al sistema de agua potable (sección 4.5), el cual se busca preservar.

Una vez definidas las características anteriores, se utilizó la guía propuesta por Kreye et al. (1996), para definir el método más práctico conforme a ciertas características geológicas: el sitio de estudio presenta principalmente materiales de origen volcánico no consolidados, interestratificados con algunos de carácter sedimentario. Estos datos permiten considerar un medio poroso; para el cual se sugiere definir las zonas de protección mediante el método topográfico (Figura 38).



**Figura 38.** Guía para determinar el método de delineación apropiado para diferentes medios geológicos y tipos de flujo (Modificado de Kreye et al., 1996)

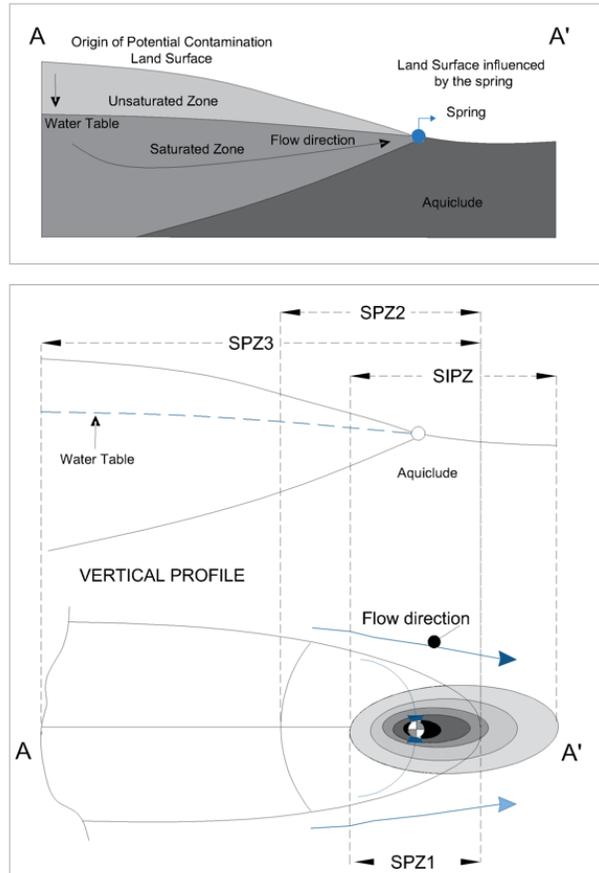
De acuerdo con Kreye et al. (1996) el área donde se recargan los manantiales asociados con sistemas de flujo poco profundos se pueden ubicar fácilmente cuesta arriba dentro de las áreas locales con mayor topografía. Debido a que el manantial Santa Fe se relaciona con un tipo de flujo hipodérmico (somero), se recomienda la

ubicación de estas áreas con el método topográfico (Kresic & Stevanovic, 2010; Kreye et al., 1996; Valle et al., 2021).

En los sistemas de flujo hipodérmico, a menudo se supone que el nivel freático es una réplica tenue de la topografía de la superficie y, como tal, los contornos del nivel freático generalmente seguirían los límites topográficos (Kreye et al., 1996). Por lo tanto, el método topográfico permite inferir la dirección del flujo de agua subterránea y sus divisiones (elementos clave para delimitar la zona potencial de captación de un manantial), al definir los límites de elevación de la superficie (Kresic y Stevanovic 2010). Valle et al. (2021) sugieren su aplicación en manantiales de tipo colgado y ubicados en zonas montañosas.

Como se comentó anteriormente, la aplicación de un solo método no es suficiente para la delimitación adecuada de SPZs. Entonces, para delimitar con menor incertidumbre las zonas de protección para el manantial de interés, se ha utilizado como base la metodología propuesta por Valle et al., (2021) donde se combina el método topográfico y balance hídrico para definir las SPZs de manantiales con características similares al manantial Santa Fe (manantial colgado, zona montañosa y flujo somero). La metodología contempla la delimitación de zonas de protección (SPZs) anteriormente mencionadas para manantiales, que para este trabajo se definen como las zonas de captura (aportación) e influencia. Dicha metodología se ha modificado para ajustarla conforme a los alcances de esta investigación, la información obtenida sobre el manantial Santa Fe y el sitio de estudio. Adicionalmente, se agregaron mapas del tipo de uso de suelo y vegetación, que proporcionan características del sitio de investigación, facilitan la identificación de zonas de recarga y contaminación (Al-Manmi & Saleh, 2019; Kresic, 2006; Kreye et al., 1996).

Conforme la metodología propuesta por Valle et al. (2021) y la práctica común de delimitación de zonas de protección, para el manantial Santa Fe se delinearón tres SPZs; SPZ3 o Zona de captura potencial (PCZ, por sus siglas en inglés): área donde el agua infiltrada puede sostener potencialmente la descarga del manantial; SPZ2 o Zona de recarga (RZ, por sus siglas en inglés): área donde la recarga puede sostener la descarga anual del manantial; SPZ1: zona inmediata al manantial y donde se encuentra el sitio de descarga (Figura 39). En añadidura, se delimitó una cuarta zona, denominada en este proyecto como zona de influencia del manantial (SIPZ, por sus siglas en inglés). Dicha zona se refiere el área donde la descarga del afluente tiene una influencia directa y observable en la superficie y/o en el ecosistema que lo rodea, es decir; donde se puede percibir cambios en la superficie causados por nivel freático somero y los caudales que emanan del manantial (diferente fauna y/o vegetación, mayor humedad en el suelo, arroyos, etc.). Estas áreas generalmente no son consideradas al momento de la delimitación de zonas de protección. Además, la SPZ1 se localiza dentro de SIPZ (Figura 39).



**Figura 39.** SPZs para el manantial Santa Fe (Modificado de Kresic & Stevanovic, 2010)

Para la delimitación de SPZ3, que es la zona de captura potencial (PCZ); sus límites se determinaron mediante la definición de contornos de elevación del terreno aguas arriba alrededor del manantial. Dichos contornos se delimitaron mediante la herramienta Watershed del software Surfer® (2016), donde se utilizó un modelo de elevación digital de alta resolución (LiDAR), la ubicación del manantial y, se consideró la mayor altura probable de recarga estimada (3660 m.s.n.m) en la sección 4.3 de este trabajo.

Por otra parte, para la definición de SPZ2, se consideró la zona de captura del manantial (SPZ3) y se estimó un área de recarga (RZ); donde la infiltración podría sostener la descarga anual del manantial (el equivalente aproximadamente 365 días de tiempo de tránsito). Se realizó el balance hídrico con el método sugerido por la SEMARNAT (2005) y de acuerdo con las condiciones del sitio de estudio (precipitación, uso de suelo, vegetación, escurrimiento y caudal promedio anual aprovechado).

Para el balance hídrico, en este trabajo la estimación de la zona de recarga se define como: área (A) dentro la de la PCZ donde el agua infiltrada (I) sustenta la descarga anual del manantial (Q), y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{R} \quad (6)$$

Q se obtuvo de las mediciones mencionadas en la sección 4.5, que fueron realizadas por el SACMEX, mientras que R (recarga promedio anual) se obtuvo de I (dentro de la PCZ), por medio de la ecuación de balance hídrico (Ec. 7) (SEMARNAT, 2005)

$$I = P - RO - ET_a \quad (7)$$

donde P: precipitación, RO: escorrentía superficial y  $ET_a$ : real evapotranspiración. El parámetro RO se estimó con base en la Ec. 8, donde P: precipitación media anual y  $C_e$ : coeficiente de escorrentía medio. Estos dos parámetros fueron calculados de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002) y conforme a los datos de precipitación del área de estudio. Mientras que el valor de K, el cual depende del tipo y uso del suelo (Ec. 9), se obtuvo de los datos edafológicos de CONABIO (2001) y de uso de suelo de la Ciudad de México de INEGI (2020).

$$RO = P * C_e \quad (8)$$

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (9)$$

Por otra parte,  $ET_a$  se calculó usando el método de Turc (Ec. 10 y 11). Donde t: es la temperatura media anual y L: parámetro que se determina con la misma variable. El parámetro de  $ET_a$  se intercambió por ETR, esto se puede realizar en un balance para una cuenca (Sánchez, 2017).

$$ETR = \sqrt{\frac{P}{0.9 \frac{P^2}{L^2}}} \quad (10)$$

$$L = 300 + 25t + 0.5t^3 \quad (11)$$

**Tabla 5.** Valores anuales para el balance hídrico y SPZ2 para el manantial Santa Fe

<b>Valores anuales para el balance hídrico y SPZ2</b>				
Precipitación (P) (mm)	Escorrentía (RO) (mm)	Evapotranspiración (Etp) (mm)	Infiltración (I) (mm)	Q (l/s)
325.08	325.08	441.84	549.98	151.00

Tanto la temperatura media anual (10.5 °C), como la precipitación media anual (Tabla 5), se obtuvieron de la base de datos de la CONAGUA de la estación meteorológica Desierto de Los Leones, la cual se encuentra dentro de la PCZ, con datos del periodo 1951-2010.

Una vez obtenidos los valores de P, RO y  $ET_a$ , la recarga I (agua infiltrada) se calculó mediante la Ec 7. Consecuentemente, se estimó el área de recarga con la Ec. 6 donde se obtuvo un valor de 8.66 km<sup>2</sup>. Las variables utilizadas para las Ecuaciones 6 y 7 se pueden observar en la Tabla 5. La delimitación de RZ no se consideró dentro del suelo urbano.

Para la SPZ1 se definió una subcuenca de aportación aguas arriba de la descarga de los afluentes en la ribera norte del río Tacubaya (dentro de la barranca). Lo anterior se realizó con el fin de abarcar las posibles infiltraciones sobre todo en la parte norte y oriente del predio. Mientras que para delinear la SIPZ, se propuso delimitar la zona de la siguiente manera; hacia el norte, se tomó en cuenta el parteaguas de la cuenca del Río Tacubaya, sin embargo como el terreno ha sido modificado, se delineó de acuerdo con el límite de la autopista Paseo de la Reforma; al sur, el límite se fijó hasta la orilla del cauce del río (en esa dirección); para los límites suroeste y noreste (dirección de la barranca y del río), se definieron 200 m hacia al oriente a partir del primer afluente que se encuentra en esa dirección y de la misma manera 200 m hacia el poniente (considerados a partir del límite del predio de captación). De esta manera, la SIPZ abarca la SPZ1: el sitio donde afloran los afluentes y sus áreas de potencial recarga inmediatas.

Los pasos utilizados en este trabajo para definir las SPZS del manantial Santa Fe se resumen en la Figura 40. Cabe recalcar, que la metodología se modificó para aprovechar los datos que estuvieron al alcance de esta investigación y que se pudieran utilizar de una manera práctica.



**Figura 40.** Pasos para la delimitación de SPZs para el manantial Santa Fe (Modificado de Valle et al., 2021)

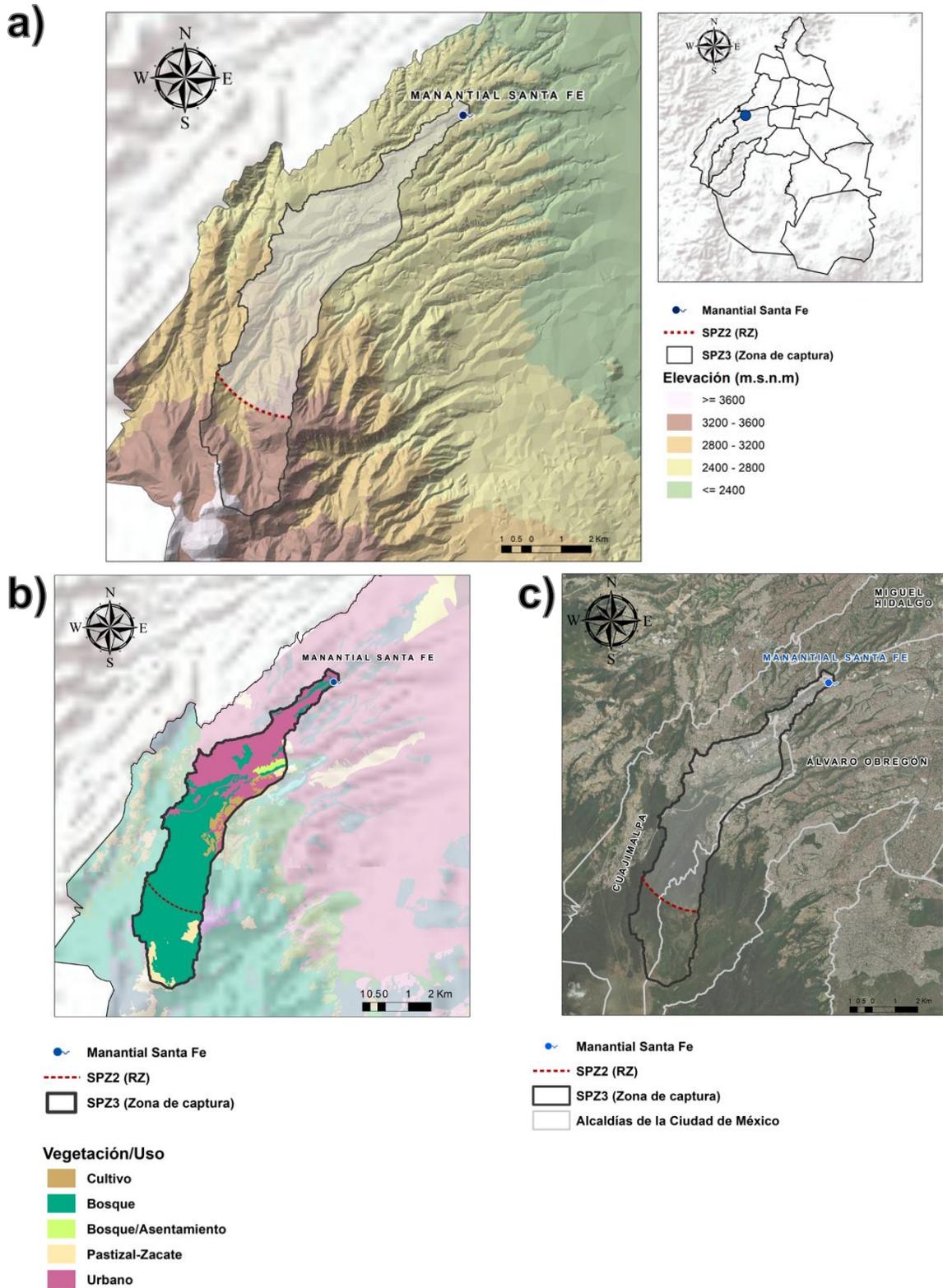
## 5.2 SPZs Propuestas para el manantial Santa Fe

Las SPZs para el manantial Santa Fe se delinearón conforme la metodología mencionada anteriormente, en las Figuras 41 y 42 se puede observar la delimitación propuesta para SPZ3 (PCZ) y SPZ2, SPZ1 y SIPZ respectivamente.

En la Figura 41 se puede apreciar la delineación de SPZ3 y SPZ2 en conjunto. El área estimada para la zona potencial de captura (SPZ3) con el método topográfico es de 33.2 km<sup>2</sup>, donde RZ equivale al 26% de su total (8.6 km<sup>2</sup>). La delimitación topográfica de la primera se extiende aguas arriba desde el área de descarga del manantial hasta el límite topográfico que incluye la mayor altura probable de recarga estimada (3,660 m.s.n.m en la Sierra de las Cruces). Por otra parte, la segunda zona con un total de 24.5 km<sup>2</sup> (que se encuentra dentro de la PCZ), se constituye de la RZ (definida en la zona boscosa) y del suelo de uso urbano y de cultivo que se encuentran aguas arriba de la descarga del manantial Santa Fe (Figura 41, b y c). El predominio de uso de suelo urbano en la cuenca Tacubaya, donde se encuentra el manantial, no presenta condiciones para la infiltración necesaria para sostener el caudal promedio anual aprovechado (151 l/s), pero las actividades antropogénicas potencialmente contaminantes siguen siendo un riesgo para el flujo subterráneo que llega hasta la zona de descarga del manantial.

La información de uso de suelo y vegetación reflejó un porcentaje importante de actividades antropogénicas dentro de SPZ3 y SPZ2. La primera zona se comprende de: 47% de bosque, 29.8% de suelo urbano, 17.6% de pastizal y el resto de tierra de cultivo. Mientras que SPZ2, se comprende de: 50% de bosque, 40% de suelo urbano, 6% de cultivo y el resto de pastizal (Figura 41b). Los anteriores porcentajes sugieren que el uso actual de estas zonas podrían contribuir de manera importante a la contaminación al flujo subterráneo, que desemboca en el manantial Santa Fe. En adición se puede observar que en las áreas más cercanas al manantial Santa Fe dentro de SPZ3, predomina el suelo urbano (Figura 41, b y c).

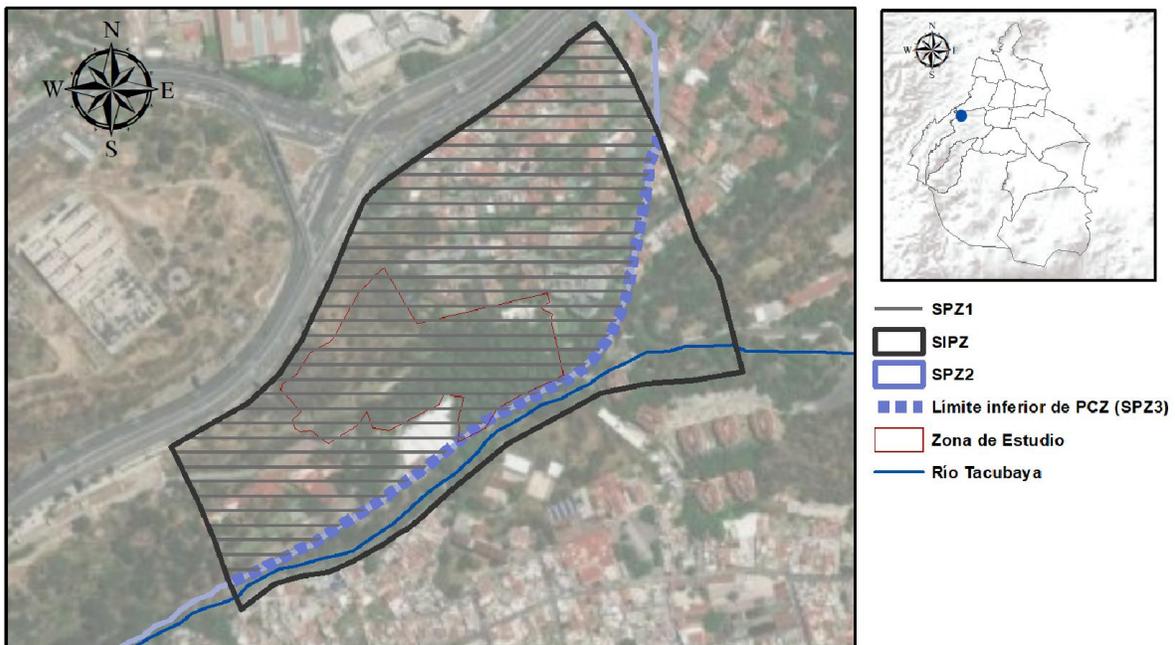
Para una mejor comprensión topográfica de la delimitación de SPZ3 y SPZ2, se presenta un modelo 3D de dichas zonas (Figura 43 a), donde se puede apreciar mejor la dirección preferencial del flujo superficial (la cual representa la dirección del flujo subsuperficial) desde las partes altas de la Sierra de Las Cruces hasta la zona de descarga del manantial Santa Fe.



**Figura 41.** SPZ3 (PCZ/Zona de captura potencial) y SPZ2 (RZ/Zona de recarga) para el manantial Santa Fe

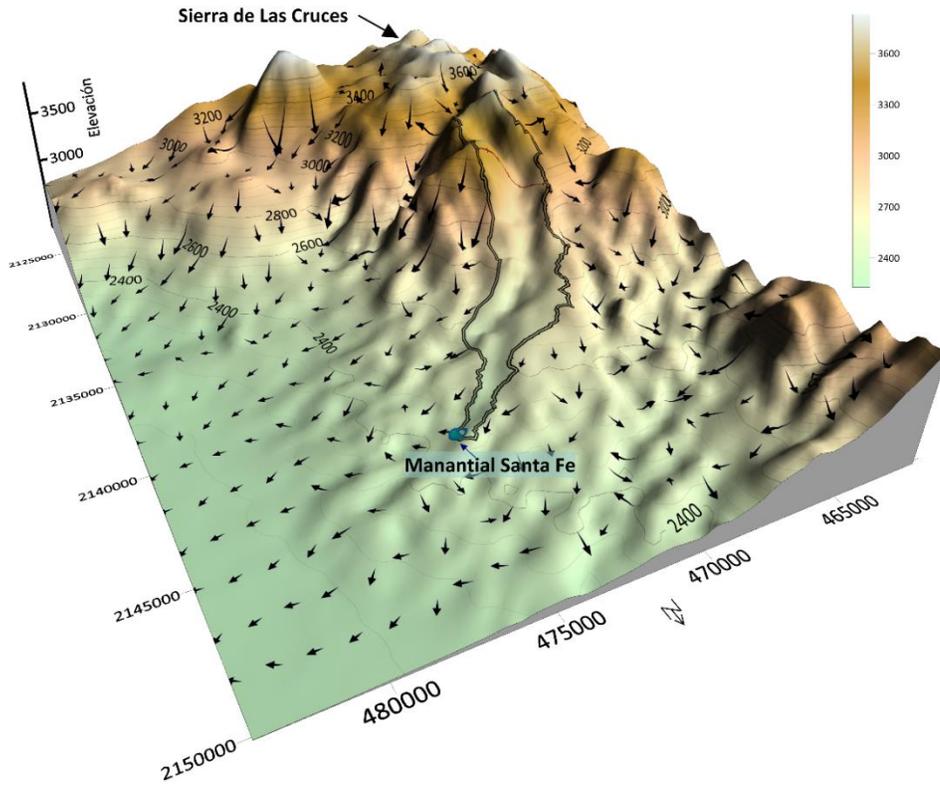
En cuanto a SPZ1 y SIPZ, se puede observar su delineación en la Figura 42. La primera es la subcuenca de aportación más próxima al manantial y la segunda, se constituye de esta última y de la delimitación para el área más próxima aguas debajo de la descarga del manantial. Si bien la infraestructura de captación para el manantial está resguarda dentro del predio de captación, dentro de SPZ1 se puede observar que hay construcciones que no corresponden solo a esta infraestructura. La presencia de asentamientos en la parte norte y oriente de la barranca presentan vulnerabilidad en cuanto a contaminación, ya que las actividades antropogénicas pueden repercutir en la calidad de las infiltraciones de esta área y el flujo subterráneo que descarga en los afluentes.

Con el fin de ilustrar la topografía que se presenta dentro de la barranca donde se encuentra el manantial, se muestra en un modelo 3D para SPZ1 Y SIPZ (Figura 43b).



**Figura 42.** SPZ1 y SIPZ para el manantial Santa Fe (Imagen Satelital de USGS de noviembre del 2022)

a) **MODELO 3D SPZ3 Y SPZ2**



b) **MODELO 3D SPZ1 Y SIPZ**

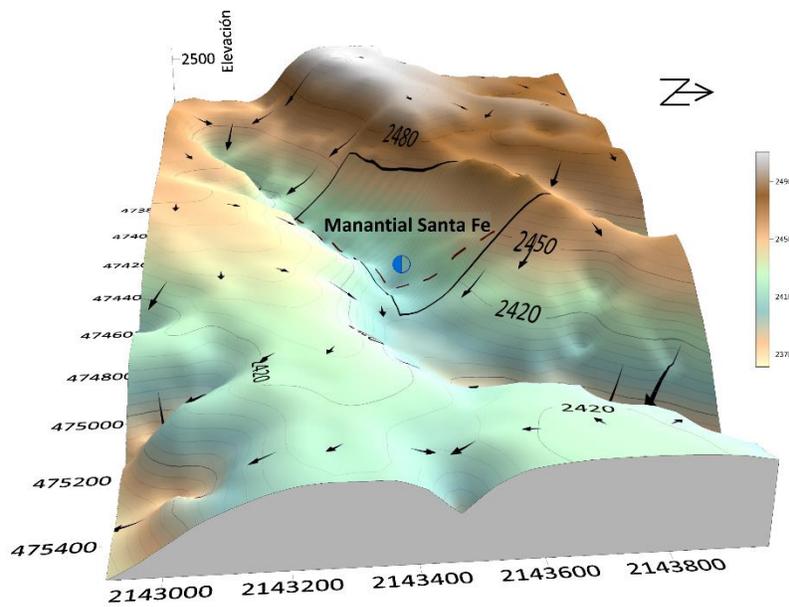


Figura 43. Modelo 3D para las SPZs del manantial Santa Fe

En general, los usos y actividades antropogénicas cerca del manantial están presentes desde de la SPZ2 (Figura 41c) y son fuentes potenciales de contaminación que pueden afectar la calidad del flujo subterráneo. Debido a la proximidad de actividades contaminantes, limita el tiempo de respuesta para contrarrestar las afectaciones que pueden ocurrir principalmente en la calidad del agua del manantial Santa Fe. Por lo tanto, si es necesario establecer y/o proponer medidas de protección. Los riesgos de no implementar medidas adecuadas a tiempo ante esta situación, pueden suscitar un paulatino deterioro de la calidad del manantial.

En la Tabla 6, se exponen medidas o restricciones que se pueden aplicar y/o adaptar para las SPZS del manantial Santa Fe. Estas medidas se basan en recomendaciones para manantiales en medios kársticos (SAEFL, 2000), sin embargo, se pueden tomar como referencia para implementar restricciones iniciales para las zonas de protección para el manantial en cuestión.

Sin bien todas las restricciones deben ser tomadas en cuenta. El área con mayor atención a su protección para el manantial es la SPZ1, debido a la inmediatez con la se puede afectar al agua que descarga en los veneros. Cabe destacar que una restricción importante e inmediata para aplicar, es la construcción dentro de esta zona. La modificación del terreno puede afectar principalmente de manera negativa las direcciones del flujo, niveles estáticos y la composición litológica (que se presenta en el subsuelo) que dan origen al manantial. Así mismo, esto puede modificar los escurrimientos e infiltraciones provocando deterioro en la calidad y cantidad agua que proporcionan el afluente al sistema de agua de potable. Además, considerando que de esta agua dependen los usuarios de las colonias aledañas, es de vital interés que todas las SPZs sean contempladas para implementar restricciones que permitan preservar y proteger el manantial Santa Fe.

**Tabla 6.** Restricciones conforme a niveles de vulnerabilidad y zonas de protección de aguas subterráneas (Modificado de Al-Manmi & Saleh (2019) con información de SAEFL 2000).

<b>Zona protegida</b>	<b>Restricción</b>
SPZ1	Ninguna construcción excepto obras de captación de recursos hídricos Sin sitios para acampar No hay sitios de estacionamiento para caravanas y casas móviles Sin instalaciones de aguas residuales de ningún tipo. Sin almacenamiento de combustible para fines de calefacción No hay infraestructura de transporte de ningún tipo (por ejemplo, carreteras, ferrocarriles, estaciones de ferrocarril, etc.) Sin almacenamiento de sustancias potencialmente contaminantes No hay almacenes de ningún tipo. No vertederos excepto para residuos de construcción limpios e inertes altamente regulados Sin canteras
SPZ2	No hay construcciones que generen aguas residuales Sin sitios para acampar No hay sitios de estacionamiento para caravanas y casas móviles No se permiten instalaciones de aguas residuales de ningún tipo, excepto en áreas altamente reguladas en circunstancias excepcionales Sin almacenamiento de combustible para fines de calefacción Sin almacenamiento de sustancias potencialmente contaminantes Almacenes restringidos a sólidos no solubles sin posibles impactos adversos en las aguas subterráneas No vertederos excepto para residuos de construcción limpios e inertes altamente regulados Sin canteras
SPZ3	Sin instalaciones de aguas residuales con posibles impactos adversos en las aguas subterráneas Almacenamiento y manipulación altamente regulados de sustancias potencialmente contaminantes Almacenes restringidos a sólidos no solubles sin posibles impactos adversos en las aguas subterráneas No vertederos excepto para residuos de construcción limpios e inertes altamente regulados No explotación de canteras excepto en circunstancias excepcionales

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

La recopilación y análisis de la información geológica e hidroestratigráfica permitió identificar en los lomeríos de las Sierra de las Cruces (donde se ubica el manantial) un medio granular que se considera una zona de recarga importante por su permeabilidad (de media a alta) y, que debido a cambios en la permeabilidad vertical y horizontal; entre materiales más permeables que otros, se generan las condiciones para dar origen al Manantial Santa Fe.

Con base en los análisis y mediciones realizadas a los parámetros fisicoquímicos: los valores de STD y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> del Manantial Santa Fe (160, 163 y 110, 110 mg/l, respectivamente), de acuerdo con los sistemas de flujo (Tóth, 1999) reflejan poca residencia del agua en el subsuelo. El valor de su temperatura (15.4°C) es muy cercano a la de la superficie, lo que nos indica su cercanía a la misma. En adición, los diagramas de Mifflin y Gibbs permiten identificar que se trata de un flujo local.

Por medio del diagrama de Piper, se pudo identificar la facie (familia) del agua afluyente: bicarbonatada cálcico-magnésica. Esta cualidad es una de las características de las aguas subterráneas al iniciar su recorrido en la zona de recarga, lo que también sugiere un menor tiempo de permanencia en el subsuelo. Además, en esta familia se suelen encontrar a las aguas dulces.

Los isótopos estables hidrógeno (Deuterio) y del oxígeno (Oxígeno-18) permitieron identificar que el agua del manantial tiene un origen meteórico. Además, aunado a la estimación de la altura de recarga probable por medio del oxígeno, se pudo definir un parteaguas para la delimitación de la zona de captura potencial del manantial (PCZ) y de tal manera identificar una zona importante de recarga: la Sierra de Las Cruces.

Mediante el índice de calidad estimado para el manantial, se observó que los valores de los parámetros fisicoquímicos analizados se encuentran dentro del rango de referencia para aguas de consumo doméstico. De igual manera, se recomienda realizar estudios hidroquímicos periódicamente con mayor detalle, para detectar posibles contaminantes y si es posible sus fuentes, con el objetivo de identificar y menguar el impacto que estos agentes contaminantes pudieran generar en la calidad del agua del manantial. Lo anterior, permitirá garantizar que todos los parámetros fisicoquímicos cumplan con los estándares de calidad. Esto es de suma importancia, dado que esta agua subterránea se utiliza para uso doméstico

La hidrogeología del sitio de estudio (que otorga permeabilidad y a su vez la retención del líquido), concede la existencia de un flujo constante. Por lo que en la temporada de precipitaciones se provoca un exceso del líquido (en comparación con el caudal durante la temporada de estiaje), y este sobrante se ve reflejado en el aumento de caudal del manantial a causa de las abundantes lluvias durante el año. Lo anterior también hace referencia a la influencia del clima en este tipo de flujo.

Los registros piezométricos proporcionaron información relevante del nivel estático en el predio de captación del manantial Santa Fe, lo cual contribuyó a la inferencia de la dirección del flujo subterráneo y su relación con la topografía del lugar. Se aconseja realizar mediciones continuamente para detectar anomalías en los niveles estáticos, sobre todo si el terreno cercano al manantial ha tenido modificaciones.

La recopilación de las características del sitio de estudio y del manantial Santa Fe, facultó proponer un funcionamiento hidrogeológico para el manantial y consecuentemente, un modelo hidrogeológico conceptual. Esto permitió clasificar el manantial hidrogeológicamente y determinar un método adecuado para la delimitación de sus áreas de protección (SPZs).

La delimitación de SPZs mediante el método topográfico, proporcionó una delimitación práctica conforme a las características analizadas y definidas para el manantial Santa Fe. Además, facilitó identificar zonas de potencial recarga acorde a las alturas estimadas de recarga probable. Sin embargo, su limitación radica en suponer que las divisiones topográficas coinciden con las del flujo subterráneo (Valle et al., 2021). Se recomienda combinar y comparar su eficiencia con otros métodos para la delimitación de zonas de protección.

El uso combinado de los métodos topográfico y de balance hídrico, para estimar las zonas de captación del manantial, permitió delinear con menor incertidumbre la zona de recarga (SPZ2). La estimación de la recarga es un parámetro importante para definir zonas de protección, pues proporciona una idea del área que se requiere para que el manantial continúe recibiendo el flujo necesario para mantenerse constante en cuanto a su cantidad y, pueda seguir sustentando el recurso hídrico a los usuarios.

La utilización de mapas de uso de suelo y vegetación facilitó una estimación con menor incertidumbre para el coeficiente de escurrimiento, la recarga anual y la identificación de zonas potenciales de recarga. Debido a que el manantial Santa Fe se encuentra dentro del suelo urbano, al considerar el estado de su cuenca local se pudo identificar que las condiciones locales (climáticas, topografía, uso de suelo) sí contribuyen en el funcionamiento del manantial, más no comprenden todos los factores para ser la única fuente de recarga y generar la infiltración suficiente para el flujo que propicia el manantial Santa Fe. Por lo tanto, se pudo identificar las condiciones de recarga y precipitación que propiciarían una recarga sustentable para el manantial.

Como se ha dicho, un manantial tiene la capacidad de cambiar el paisaje que lo rodea y, considerablemente, el área donde descarga; donde la mayoría de las ocasiones se encuentra flora y fauna endémica. Por tales motivos, las áreas de influencia (SIPZ) deberían considerarse relevantes para el ecosistema donde se encuentran y ser tomadas en cuenta al definir zonas de protección, para que de igual manera sean zonas protegidas.

La metodología utilizada como base para delimitar las SPZs en este trabajo, se modificó para adaptarla a la información del sitio de estudio y del manantial Santa Fe. Tal metodología propuesta puede aplicarse a manantiales con características similares. Sin embargo, es importante recordar que en la naturaleza cada manantial y su sistema hidrogeológico tiene condiciones particulares, es determinante tomarlas en cuenta para una delimitación más apropiada para cada uno de los afluentes que se le desee delimitar SPZs.

Es importante aclarar que la delimitación de SPZs para el manantial Santa Fe es preliminar. Dicha metodología se modificó con el fin de proporcionar una metodología práctica para el tipo de afluentes con características semejantes a las del manantial, pero es posible modificar y mejorar conforme a nuevos objetivos y alcances. Además, se puede combinar y utilizar otros métodos con información más detallada acerca del afluente en estudio.

La definición de las zonas de captura e influencia (SPZs) para el manantial Santa Fe, tienen el objetivo de resguardar esas áreas de tal manera que se preserve la calidad y cantidad del agua del manantial y, así mismo, el ecosistema que depende de esta agua subterránea. Su ubicación urbana le concede una utilización a su caudal que es indispensable para su localidad, no obstante, también cierta desventaja al carecer de medidas de protección para su preservación. Por lo tanto, considerar y aplicar las restricciones para estas zonas permite evitar su deterioro y en particular, aquellas áreas que son más cercanas al afluente y que su daño repercutiría en mayor medida en el manantial.

La delimitación de las SPZs y la caracterización hidrogeológica para el manantial Santa Fe, permitieron identificar zonas de vulnerabilidad del manantial respecto a las futuras obras que se pudieran planear en sus alrededores, de manera que se puedan tomar en cuenta para que su realización no repercuta en su sistema hidrogeológico. Aunque este trabajo propone esclarecer este último, es necesario un estudio más detallado para determinar lo zonas más vulnerables para el afluente en su entorno urbano.

La caracterización hidrogeología del manantial, proporcionó información de manera integral acerca de las propiedades del agua del manantial como origen, familia hidrogeoquímica, sistema de flujo, calidad, áreas de recarga probable, etc. Dichas propiedades facultaron describir el funcionamiento hidrogeológico del manantial. Se espera que este último se considere al tomar decisiones para poder optimizar y proteger su aprovechamiento, y procurar en mayor medida, no perjudicar el sistema que da origen al manantial Santa Fe.

## 7 Referencias

- Al-Manmi, D. A. M. A., & Saleh, K. A. (2019). Delineation of spring protection zone and vulnerability mapping of selected springs in Sulaymaniyah area, Kurdistan, Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 78(21), 622. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8632-2>
- Aly, A. A., Al-Omran, A. M., & Alharby, M. M. (2015). The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 4177–4190. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1463-2>
- Ángel de Miguel, Lado, J. J., Martínez, V., & Leal, M. (2009). El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanzas de Las Ciencias de La Tierra*, 78–85.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J., & 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. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Aréchiga Ernesto. (2004). De la exuberancia al agotamiento. Xochimilco y el agua. Política, urbanización y medio ambiente. . In *Historia de Xochimilco en el siglo XX* (pp. 94–149).
- Arellano, A. (1953). Estratigrafía de la Cuenca de México. *Memoria Del Congreso Científico Mexicano*, 13, 1–20.
- Arsenio, E. H. L. M. P. I. Z. (2010). *Rescate de rios urbanos: Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos*. UNAM.
- Banco Mundial. (2013). *Agua en el Valle de México*.
- Baker, C. H., & Foulk, D. G. (1975). National Water Data Storage and Retrieval System: instructions for preparation and submission of groundwater data.
- Belitskaya, V. D. (2010). VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SUS EFECTOS. In *ATLAS DE CUENCAS: HIDROGRÁFICAS DE LAS CUENCAS*.
- Bernárdez de la Granja, M. del C. (2012). Acueducto de Xochimilco. *Villes En Parallèle*, 45(1), 202–234. <https://doi.org/10.3406/vilpa.2012.1494>
- Bernárdez de la Granja, M. del C. (2016). *La huella del agua siglo XX: el Acueducto de Xochimilco y el Sistema Lerma*.

- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A Water Quality Index — Crashing the Psychological Barrier. In *Indicators of Environmental Quality* (pp. 173–182). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15)
- Bryan, K. (1948). Los Suelos Complejos y Fósiles de la Altiplanicie de México en relación a los Cambios Climáticos. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 13(1). <https://doi.org/10.18268/BSGM1948v13n1a1>
- Caine, J. S., Evans, J. P., & Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2)
- Carrera, M. (1949). Planos de la Ciudad de México. *Boletín de La Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística.*, 263–427.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Huizar-Álvarez, R., & Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 55(2), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1005-2>
- Chebotarev, I. I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 8(1–2), 22–48. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)
- Civita, M. V. (2008). An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal*, 16(5), 855–869. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0283-4>
- CONAGUA. (2018a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana.*
- CONAGUA. (2018b). *Estadísticas del Agua en México.*
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero zona Metropolitana de la Cd. de México.*
- Cortés, A., & Durazo, J. (2001). Tendencia del oxígeno-18 en la precipitación del centro de México. *Ingeniería Hidráulica En México*, 16(2), 93–102.
- Cortés, A., & Farvolden, R. N. (1989). Isotope studied of precipitation and groundwater in the sierra de las Cruces, Mexico. *Journal of Hydrology*, 107(1–4), 147–153. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90055-3)
- Cortés, H. (1975). *Cartas de Relación, “Sepan cuantos...”* (Porrúa, Ed.).
- Covarrubias, M. (2015). Utópico pueblo absorbido por la Ciudad de México. *Arqueología Mexicana Núm. 134*, 74–79.
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea, Segunda Edición*. Edición Omega.
- Dansgaard, W. (1954). The O18-abundance in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6(5–6), 241–260. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(54\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(54)90003-4)
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales., Diario Oficial de la Federación, México (2002).
- Durazo, J. (1996). Acuitardo superficial y contaminación acuífera. *Ingeniería Hidráulica En México*, 5–14.
- Enciso De la Vega, S. (1992). Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. *Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 10, 26–36.
- Environment Agency. (2019). *Manual for the production of Groundwater Source Protection Zones*.
- EPA. (1994). *Groundwater and Wellhead Protection*. United States Environmental Protection Agency.
- EPA. (1998). *Handbook-Groundwater and Wellhead Protection*. United States Environmental Protection Agency.
- EPA, E. P. A. (2002). Predicting Ground Water Flow. In *Magnificent Ground Water Connection* (pp. 107–112).
- Escolero, O. A., Martínez, S. E., Kralisch, S., & Perevochtchikova, M. (2009). *Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México*.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th Edition). Prentice Hall.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, .
- Fuentes, A. O. (2011). *Elaboración de un sistema de información geográfica para definir el peligro en las zonas minadas en la delegación Álvaro Obregón, México D.F.* UNAM.
- Fullen, K., Mandish, T., & Mahrtdt, C. (2016). *Ecological consideration in spring development*.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2018). *Delegación Álvaro Obregón*.
- Gat, J. R., & Gonfiantini, R. (1981). *Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle*.

- Gil Marin, J. A., Vizcaino, C., & Veliz, C. E. (2019). Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de Estudio: Acuíferos de Maturín, Estado Monagas, Venezuela. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(3), 9. <https://doi.org/10.25127/aps.20193.488>
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., & Hötzl, H. (2000). The PI method - A GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift Fur Angewandte Geologie*, 46, 157–166.
- González, G. (2020). *La naturaleza intermitente de la precipitación de la Ciudad de México*. UNAM.
- González-Abraham, Antalia., Fagundo-Castillo, Reynerio, Juan., Carrillo-Rivera, José Joel, & Rodríguez-Estrella, Ricardo. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 64 (3), 319–333.
- IMTA. (1989). *Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato*.
- INEGI. (2002a). *Carta E14-2 Geología y Litología*.
- INEGI. (2002b). *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002. Archivo 3*.
- INEGI. (2005). *Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica*.
- INEGI. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México*.
- Izazola, H. (2001). Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*.
- Jensen, M. E., Lowe, M., & Wireman, M. (1997). *Investigation of hydrogeologic mapping to delineate protection zones around springs: report of two case studies*. United States Environmental Protection Agency.
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*.
- Karlović, I., Marković, T., Vujnović, T., & Larva, O. (2021). Development of a Hydrogeological Conceptual Model of the Varaždin Alluvial Aquifer. *Hydrology*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010019>
- Kresic, N. (2006). *Hydrogeology and Groundwater Modeling (second)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420004991>
- Kresic, N., & Stevanovic, Z. (2010). *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability 1st Edición*. ELSEVIER BUTTERWORTH HEINEMANN.

- Kreye, R., Wei, M., & Reksten, D. (1996). *Defining the Source Area of Water Supply Springs*.
- Legorreta, J. (2006). *El agua y la Ciudad de México. Ciudad de México*.
- Leyva, E. (2010). Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. UNAM.
- Lesser y Asociados. (1990). Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica En México*.
- Lesser y Asociados. (2005). El agua subterránea de la Ciudad de México. *Memorias Del V Congreso de Aguas Subterráneas*.
- Lombardo, S. (1972). *Desarrollo urbano de México-Tenochtitlan*.
- Lugo-Hubp, J., Cordero Estrada, M., & Zamorano Orozco, J. J. (1995). Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la delegación Alvaro Obregón, Distrito federal, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 52–67.
- Margat, J., & Gun, J. van der. (2013). *Groundwater around the World*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13977>
- Martínez, T. (2015). *Caracterización Hidrogeoquímica del sistema de manantiales termales de Ixtapan de la Saltonatico, estado de México*.
- Meinzer, O. E. (1923). Outline of groundwater hydrology with definitions. . *US Geological Survey Water-Supply, Paper-494*, 48–54.
- Mifflin, M. D. (1988). Region 5, Great Basin. In *Hydrogeology* (pp. 69–78). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-O2.69>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2000). La Situación Actual y los Problemas Existentes y Previsibles. In *Libro Blanco del Agua en España*.
- Monroy, L. (2022). *Caracterización Hidrogeoquímica del agua subterránea de la parte suroccidental de la Cuenca de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mooser, F., & Molina, C. (1993). *Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca*, *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra*.
- Mooser, F., Montiel-Rosado, A., & Zuñiga-Arista, A. (1992). El suroeste de la cuenca de México en el nuevo mapa geológico. *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, 5–16.
- Moreau, M., Cameron, S., Daughney, C., Gusyev, M., & Tschritter, C. (2014). *Envirolink Tools Project - Capture Zone Delineation - Technical Report*.

- Moreno, R. (2008). *Arquitectura hidráulica en la Nueva España, fuentes en Ciudad de México virreinal*.  
[https://doi.org/https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000632115](https://doi.org/https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000632115)
- Naumburg, E., Mata-gonzalez, R., Hunter, R. G., Mclendon, T., & Martin, D. W. (2005). Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation. *Environmental Management*, 35(6), 726–740.  
<https://doi.org/10.1007/s00267-004-0194-7>
- OMS. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4th ed.).
- Orodoñez, J. J. (2011). *Agua subterránea-Acuíferos*. Sociedad.
- Orozco, M. (1864). *Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México*.  
[https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=\\_suri:DGB:TransObject:5bce59877a8a0222ef15e084](https://mexicana.cultura.gob.mx/en/repositorio/detalle?id=_suri:DGB:TransObject:5bce59877a8a0222ef15e084)
- Orozco, M. (1980). *Historia de la Ciudad de México: desde su fundación hasta 1854* (Diana).
- Palma, A., Rivera, A., & Carmona, R. (2022). A Unified Hydrogeological Conceptual Model of the Mexico Basin Aquifer after a Century of Groundwater Exploitation. *Water*, 14(10), 1584. <https://doi.org/10.3390/w14101584>
- Paradinas, C. (2015). *Caracterización del clima en la Ciudad de México: Precipitación* [Tesis de Máster en Meteorología y Geofísica]. Universidad Complutense de Madrid.
- Paradis, D., Martel, R., Karanta, G., Lefebvre, R., Michaud, Y., Therrien, R., & Nastev, M. (2007). Comparative Study of Methods for WHPA Delineation. *Ground Water*, 45(2), 158–167. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00271.x>
- Peñafiel, A. (1884). *Memoria de las Aguas Potables de Ciudad de México*.
- Pérez, J., Ávila Olivera, J. A., & Israde Alcántara, I. (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso de la zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 675–688. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a5>
- Pineda, R. (1995). *Origen, vida y muerte del Acueducto Santa Fe*.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914.  
<https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Poehls, D., & Smith, G. (2009). *Encyclopedic dictionary of hydrogeology*.

- Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna, G. (2009). Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *E-Journal of Chemistry*, 6(2), 523–530. <https://doi.org/10.1155/2009/757424>
- Ramos, J. (2003). *Método para obtener la conductividad del suelo analizando la cubierta edáfica de la República Mexicana y mediciones de campo eléctrico*. Instituto Politécnico Nacional.
- Rivera, M. M. y. (1914). *Memorias de las Obras de Aprovechamiento de Agua Potable de la Ciudad de México*.
- Romero, P. (1999). Agua en la Ciudad de México durante el Porfiriato. *Relaciones*, 133–152.
- SACMEX. (2018). *Diagnóstico, logros y desafíos*.
- Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea*. F. Javier Sánchez San Román.
- Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., & León, E. (2005). Síntesis Geotécnica de La Cuenca Del Valle de México.
- Secretaría de Protección Civil. (2014). *Atlas de peligros y riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los mapas de riesgos: Álvaro Obregón*.
- SEDEMA. (2012). *Barrancas urbanas del surponiente del Distrito Federal, Áreas de valor ambiental*. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- Seegerstrom, K. (1962). Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: *United States Geological Survey Bulletin*, 87–162.
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana Proy-Nom140-Semarnat-2005, . Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2005).
- Springer, A. E., & Stevens, L. E. (2009). Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal*, 17(1), 83–93. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0341-y>
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>
- Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J., Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G., & Oyunbaatar, D. (2007). Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia. *Journal of Hydrology*, 333(1), 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.026>
- Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., & Palomares, R. B. (2013). Composición Isotópica del Agua Subterránea y su Relación con la Salinidad en el Valle de San Luis Río Colorado en Sonora, México. *Información Tecnológica*, 24(2), 57–66. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200008>

- Valle, S. L., Castillo, J. L. E., Alberich, M. V. E., Albores, M. A. G., Tavares, J. P., & Esquivel, J. M. (2021). Delineation of protection zones for springs in fractured volcanic media considering land use and climate change scenarios in central Mexico region. *Environmental Earth Sciences*, 80(9), 366.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09662-y>
- Vázquez, E., & Jaimes, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional, Instituto de Geofísica, UNAM*.
- Vélez, M. v. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Winter, T., Harvey, J., Franke, O., & Alley, W. (1998). *Ground water and surface water a single resource*. USGS.