



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO – GEOFÍSICO SOBRE EL  
FRACTURAMIENTO ASOCIADO AL SISMO DEL 19 DE  
SEPTIEMBRE DE 2017 EN LA POBLACIÓN DE SAN LUIS  
TLAXIALTEMALCO, ALCALDÍA DE XOCHIMILCO EN LA CIUDAD  
DE MÉXICO.

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO GEÓLOGO**

**P R E S E N T A**

Juan Antonio Vanegas Terreros

**ASESOR DE INFORME**

Ing. Gabriel Salinas Calleros



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



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.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haber permitido mi formación profesional.

A mis padres: Juan Antonio Vanegas Romero (+), Aline Terreros Narváez sabiendo que no existirá una forma de agradecer una vida de sacrificio y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es suyo y que la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo.

Al Ingeniero Gabriel Salinas Calleros por el desarrollo y culminación de esta tesis y por las enseñanzas de prácticas adquiridas en campo, al ingeniero Alberto Arias Paz por su apoyo en trabajos de campo y de gabinete, al licenciado Sergio Enrique Macías Medrano por el apoyo en la elaboración de mapas en QGIS.

A mis tíos:

- Familia Vanegas Romero en especial a mi tío Alejandro Vanegas Romero y a mi tía María de Jesús Hernández Pacheco por su cariño, apoyo y compañía en momentos donde más los necesitamos y por ayudarme a cerrar esta etapa de mi vida, a la familia Hernández Vanegas por su apoyo que obtuve en el transcurso de mi vida personal y profesional.
- Familia Terreros Narváez en especial a la familia Regalado Terreros por sus buenos deseos cariño y comprensión que siempre he recibido y a la familia Bello Terreros sabiendo que la distancia no fue un obstáculo para demostrar su apego y afecto que siempre he recibido, a mis tíos María Eugenia, Elizabeth y Benjamín por su cariño.
- Familia Ocegueda Infante en especial a la licenciada Ángeles Ocegueda Infante por estar presente y demostrarnos que el vínculo que nos une no es la sangre, si no el amor y así mismo agradezco a las licenciadas Juana Ocegueda Infante y Grisel Ocegueda Infante por considerarnos parte de su familia y así mismo por compartir bellos momentos que llenaron mi vida de enseñanzas y alegría.

A los habitantes del pueblo de San Luis Tlaxiátemalco ya que permitieron realizar esta investigación, gracias a sus innumerables apoyos y a la familia Valencia Gonzáles por brindarnos su hogar y viáticos.

“Hay hombres que luchan un día y son buenos.  
Hay otros que luchan un año y son mejores.  
Hay quienes luchan muchos años, y son muy buenos.  
Pero los hay que luchan toda la vida: esos son los imprescindibles.”

**Bertolt Brecht.**

**En memoria a mi padre.**

Índice	
RESUMEN .....	1
OBJETIVOS .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. MARCO FÍSICO DE REFERENCIA .....	5
2.1 Fisiografía y geomorfología .....	5
<b>2.1.1 Fisiografía</b> .....	5
<b>2.1.2 Geomorfología</b> .....	7
2.2 Climatología .....	8
2.3 Hidrología.....	11
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	12
3.1 Recopilación e integración de información .....	12
3.2 Entrevistas .....	13
3.3 Cartografía geológica.....	18
<b>3.3.1 Aspecto geológico</b> .....	18
4. GEOLOGÍA.....	20
4.1 Estratigrafía .....	20
<b>4.1.1 Objetivos</b> .....	20
4.2 Análisis estructural .....	24
<b>4.2.1 Sismo del 19 de septiembre en la ciudad de México</b> .....	24
<b>4.2.2 Caminamientos N-S, E-W</b> .....	28
<b>4.2.3 Proyecciones estereográficas</b> .....	46
5. GEOFÍSICA .....	48
5.1 Exploración geofísica .....	48
<b>5.1.1 Fundamentos teóricos</b> .....	48
<b>5.1.2 Profundidad de investigación y función de sensibilidad</b> .....	49
5.2 Descripción de la zona de estudio.....	49
5.3 Adquisición de datos TRE .....	51
5.4 Resultados.....	52
6. Censo de aprovechamientos .....	53
6.1 Pozos.....	53

6.2 Piezometría .....	54
6.3 Pruebas de bombeo .....	55
<b>6.3.1 Objetivos de la prueba</b> .....	55
<b>6.3.2 Metodología de ejecución</b> .....	55
<b>6.3.3 Elección del sitio de prueba</b> .....	55
<b>6.3.4 Características del pozo de bombeo</b> .....	56
<b>6.3.5 Realización de las pruebas</b> .....	57
<b>6.3.6 Interpretación de la prueba de bombeo en pozo San Luis Tlaxialtemalco 9</b> ...	59
<b>6.3.7 Interpretación de la prueba de bombeo en pozo San Luis Tlaxialtemalco 10</b>	61
<b>6.3.8 Configuración del nivel estático</b> .....	63
<b>6.3.9 configuración del nivel estático en el área de estudio</b> .....	64
6.4 Hidrogeología.....	71
<b>6.4.1 Funcionamiento hidrogeológico</b> .....	71
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	75
8. BIBLIOGRAFÍA .....	79

## RESUMEN

En la historia de la alcaldía de Xochimilco, en la Ciudad de México, por su posición geográfica ha presentado episodios de abundante precipitación pluvial lo cual provocaba que de manera natural brotaran manantiales por diferentes zonas del poblado, pero con el paso del tiempo la población ha ido aumentando a pasos agigantados y llegó con ello la pavimentación de calles y construcción de numerosas casas.

Debido a la morfología del Valle de México, antiguamente era un valle que drenaba hacia el sur. Las corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por las emisiones de productos volcánicos que dieron origen a la Sierra Chichinautzin, dejando al Valle de México sin drenaje al exterior, razón por lo que se acumuló agua en las partes más bajas del valle, dando origen a la cuenca con los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac, mencionados de norte a sur, actualmente desecados o en proceso de desecación, aunado a esto el sismo que sacudió la Ciudad de México el día 19 de septiembre de 2017 trajo consigo nuevos problemas para los pobladores como el reacomodo y hundimiento acelerado del suelo sobre el cual están construidos los predios, agrietamientos en las calles, escases de agua en la zona de chinampas, así como derrumbes de los canales que las abastecen, cabe resaltar que es un pueblo que en su mayoría la población ha dedicado sus esfuerzos para hacer producir la tierra en las llamadas chinampas, esa extensión del cultivo sobre el agua, en superficies de cieno y limo.

Para ello el análisis hidrogeológico- geofísico, estratigráfico y estructural en conjunto podrán dar recomendaciones a los pobladores:

- 1.- Para señalar zonas con algún tipo de riesgo para la construcción de casas – habitación en donde no se debe construir.
- 2.- Recomendaciones para realizar construcciones que sean más seguras y así, prevenir futuros eventos catastróficos naturales tal y como los que provocó el sismo mencionado.

## **ABSTRACT**

in the history of the mayor's office of Xochimilco, in Mexico City, due to its geographical position, it has presented episodes of abundant rainfall which caused natural springs to sprout through different areas of the town, but with the passage of time the population has It has been increasing by leaps and bounds and the paving of streets and the construction of numerous houses have come along.

Due to the morphology of the Valley of Mexico, it used to be a valley that drained towards the south. The surface currents that circulated in this direction were interrupted by the emissions of volcanic products that gave rise to the Sierra Chichinautzin, leaving the Valley of Mexico without drainage to the outside, reason why water accumulated in the lower parts of the valley, giving origin to the basin with the lakes of Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco and Tláhuac, mentioned from north to south, currently desiccated or in the process of drying, coupled with this the earthquake that shook Mexico City on September 19, 2017 It brought with it new problems for the inhabitants such as the rearrangement and accelerated collapse of the land on which the buildings are built, cracks in the streets, lack of water in the chinampas area, as well as landslides of the canals that supply them, it should be noted that It is a town that, for the most part, the population has dedicated its efforts to produce the land in the so-called chinampas, that extension the cultivation on the water, in silt and silt surfaces.

For this, the hydrogeological-geophysical, stratigraphic and structural analysis as a whole may give recommendations to the inhabitants:

- 1.- To indicate zones with some type of risk for the construction of houses - room where it should not be built.
- 2.- Recommendations to make constructions that are safer and thus prevent future natural catastrophic events such as those caused by the aforementioned earthquake.

## **OBJETIVOS**

Conocer las características geológicas del subsuelo en la población de San Luis Tlaxialtemalco, para analizar los factores que interactúan en el fracturamiento de calles y casas habitación y su asociación con la extracción de agua subterránea, y con el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Utilizar métodos directos e indirectos con el propósito de correlacionar y generar una estratigrafía del subsuelo.

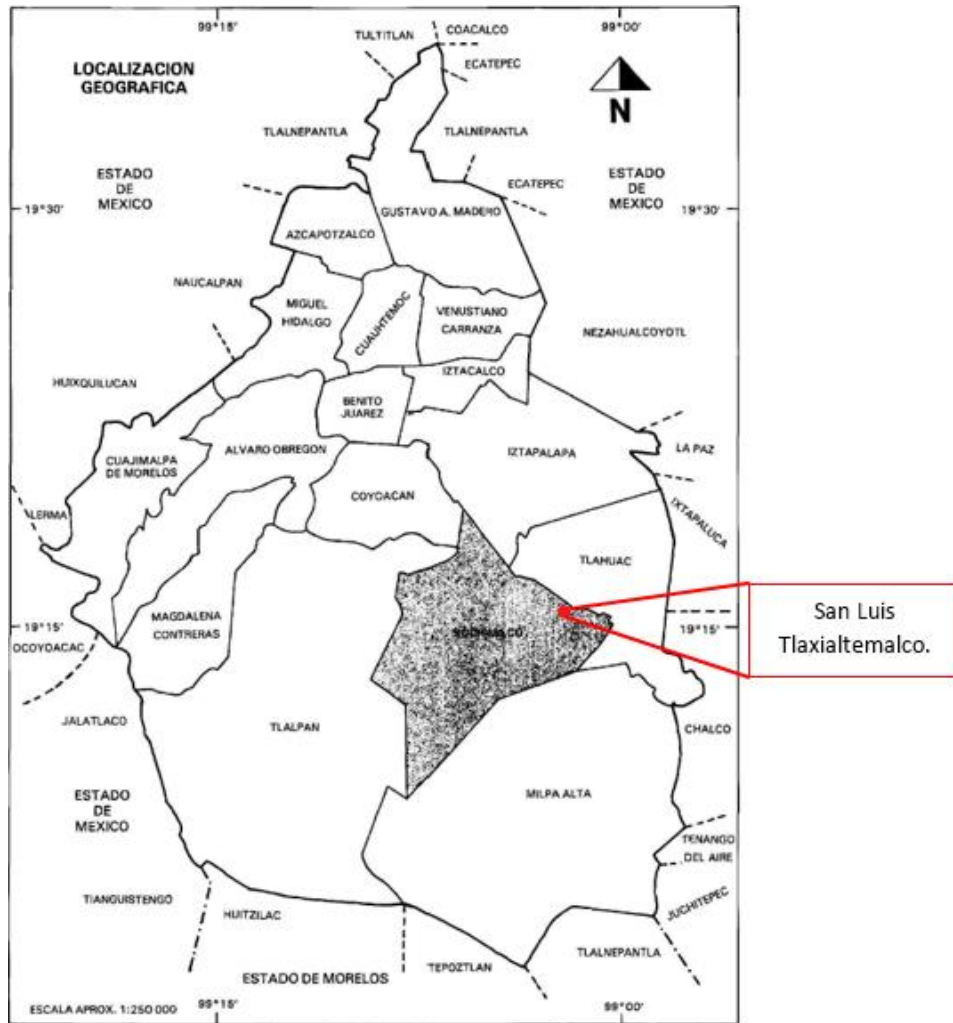
Generar un mapa geológico de riesgos y relacionar el sobre bombeo del agua subterránea con la subsidencia del terreno.



# 1. INTRODUCCIÓN

El pueblo San Luis Tlaxialtemalco se localiza en la Alcaldía de Xochimilco en la Ciudad de México (antes Delegación Xochimilco, Distrito Federal). El clima predominante es templado húmedo con lluvias en verano, presenta una temperatura media anual de 12 °C, con máximas de 22 °C.

La alcaldía de Xochimilco colinda al norte con las alcaldías Tlalpan, Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac; al este con Tláhuac y Milpa Alta; al sur con Milpa Alta y Tlalpan; al oeste con la alcaldía Tlalpan (Figura 1).



- Figura 1. Límites de las alcaldías de la ciudad de México (imagen tomada del cuaderno de información básica delegacional).

Esta alcaldía forma parte del Sector Metropolitano Sur, junto con Tlalpan, Magdalena Contreras y Coyoacán. Se caracteriza por formar parte de la Cuenca del Valle de México, al ser una de las 16 alcaldías que la conforman.

Presenta diferentes tipos de terreno de acuerdo con la clasificación que estipula el reglamento de construcciones de la ahora Ciudad de México, los cuales se enuncian a continuación:

Zona I Cerril. Esta se localiza en la parte oriente, sur y surponiente de la alcaldía, específicamente en la parte alta de la Sierra Chichinautzin.

Zona II Transición (centro). Esta se localiza en la parte oriente, sur y surponiente a lo largo de la Sierra Chichinautzin en la parte baja de la misma.

Zona III Lacustre. Esta se localiza en la parte centro y norte.

La zona de estudio del presente trabajo se localiza en las porciones sur y oriente de la Ciudad de México en donde se localizan las sierras Chichinautzin y Santa Catarina. Está constituida por rocas basálticas de alta permeabilidad, mismas que a su vez alojan los acuíferos de mayor rendimiento de la Cuenca, así como las zonas de recarga más importantes, haciendo que la calidad del agua sea excelente en la mayoría de los pozos localizados hacia la Sierra de Chichinautzin, con excepción de algunos ubicados en la porción sureste que se han contaminado por fuentes locales.

La alcaldía Xochimilco tiene una cobertura del 93%, de agua potable que se extrae de pozos que en conjunto acumulan un volumen de aproximadamente 3.2 metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), una parte se destina al consumo interno ( $1.0 m^3/s$ ) y el resto del caudal abastece a las alcaldías Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Tlalpan, Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc a través de los acueductos Xochimilco y Chalco - Xochimilco.

La principal problemática en el suministro del agua se encuentra en el sobrebombeo del acuífero. Este elemento es de vital importancia para el equilibrio ambiental micro regional. De esta manera, aun cuando Xochimilco es el territorio que provee a la Ciudad de aproximadamente el 20% de recurso hídrico, su abastecimiento local se estima bajo, situación que está alterando el ecosistema local y regional.

## **2. MARCO FÍSICO DE REFERENCIA**

### **2.1 Fisiografía y geomorfología**

#### **2.1.1 Fisiografía**

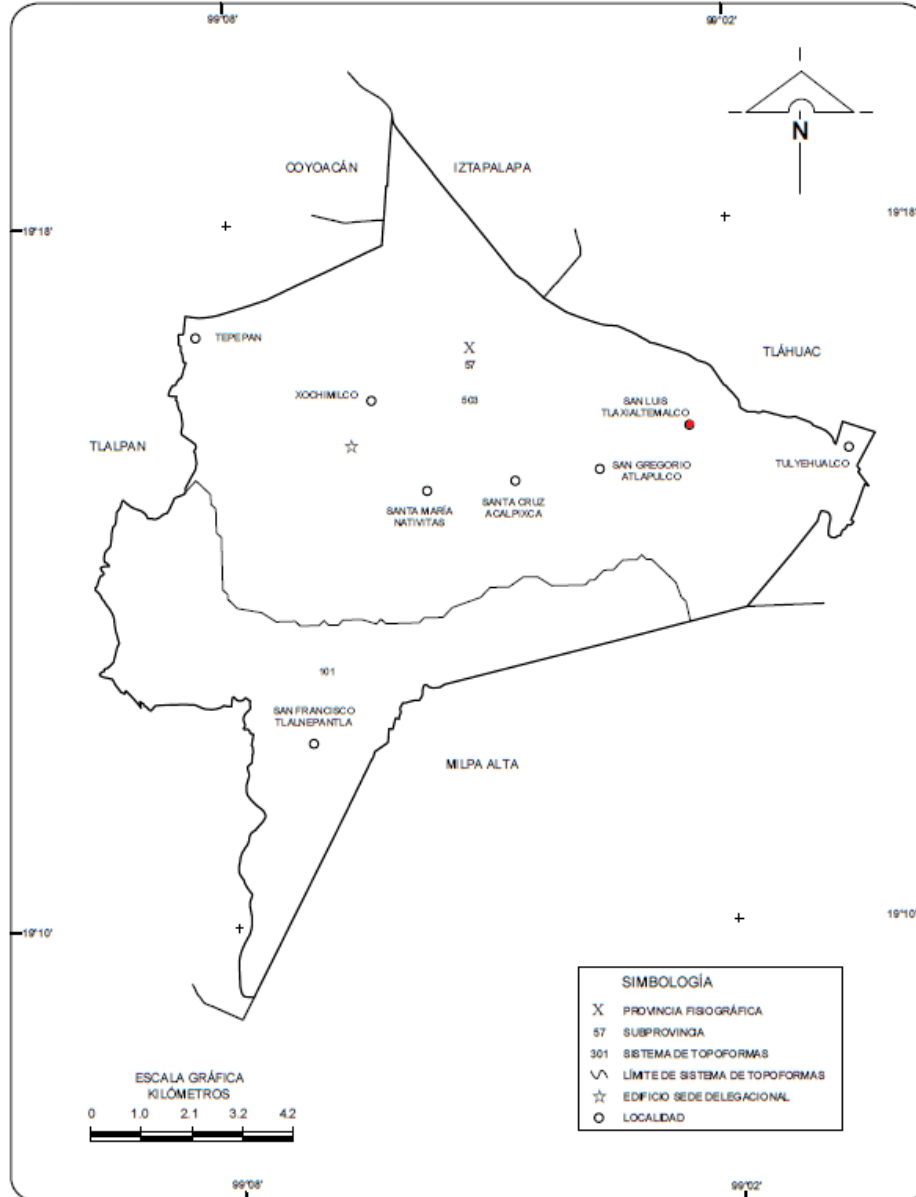
De acuerdo con el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Xochimilco del Distrito Federal (PDDU, 2005), el territorio de la alcaldía se ubica en el extremo sur de la Cuenca de México, la cual está separada de la porción central de la misma por la Sierra de Santa Catarina en dirección Oeste–Este y que es paralela a la Sierra del Chichinautzin.

El 30% del terreno de la alcaldía corresponde al antiguo lecho lacustre de la Depresión Xochimilco y el resto está constituido por las estructuras tectovolcánicas principales: Sierra de Chichinautzin y Sierra de Xochitepec. Todas estas estructuras han sido identificadas fisiográficamente como lomeríos de basalto, basalto con cráteres, ignimbritas y volcanes en escudo (PDDU, 2005).

La formación geológica de la región lacustre (vaso lacustre, lacustre salino y lacustre de piso rocoso), donde se localiza la alcaldía Xochimilco dentro de la cuenca, se remonta a finales del Neógeno y principios del Cuaternario, cuando el drenaje de la parte sur del valle fue obstruido por la formación de una barrera volcánica (Sierra del Chichinautzin) que dio origen a la cuenca endorreica de México (PDDU, 2005).

La región de estudio, pertenece a la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 2) y a la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, la cual presenta la topoforma de llanura lacustre y aluvial. Las características geomorfológicas relevantes de Xochimilco están representadas por las zonas plana o lacustre, de lomas y de transición.

## Fisiografía



FUENTE: INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica, 1:1 000 000, serie I.

- Figura 2. Provincia fisiográfica del área de estudio. Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco, Distrito Federal, edición 2007.

### 2.1.2 Geomorfología

Las características geomorfológicas relevantes de Xochimilco están representadas por las zonas plana o lacustre, de lomas o cerril y de transición o centro (Figura 3).



- Figura 3. Modelo Geomorfológico de la delegación Xochimilco (Generado en ArcScene).

El pueblo de San Luis Tlaxialtemalco se divide en 3 zonas las cuales dependen de su fisiografía, ya que en la zona cerril es donde se encuentra la topografía en promedio  $9^{\circ}$  de inclinación y está compuesta mayoritariamente por rocas de tipo basálticas.

La zona centro fue la más afectada por el sismo del 19 de septiembre de 2017, su topografía teniendo en promedio  $3^{\circ}$  de inclinación en donde está constituida de rellenos de roca descendientes del Teuhtli, ceniza volcánica, grava, arena y arcilla.

En la zona lacustre no presenta inclinación del terreno es totalmente una planicie, según información obtenida por personas que se dedican al cultivo de flores en chinampas, debido al movimiento sísmico se abrieron grietas y durante el mismo estas se cerraron inmediatamente debido al movimiento y en parte a que es un suelo no compactado, para realizar este estudio se recabo información de cortes litológicos y se realizaron entrevistas con personas de la localidad.

## 2.2 Climatología

Los lugareños comentan que el clima en la alcaldía Xochimilco era el mejor de toda la cuenca de México; el Lago de Xochimilco que era de agua dulce y muy pura, servía como estabilizador del clima.

Las lluvias tienen lugar principalmente durante verano y otoño con una media anual de 869 mm. Sin embargo, debido a las diferencias de la altura por el relieve, se encuentran también dos subtipos de climas: templado húmedo, en llanura y región baja; y templado con invierno frío, que corresponde a las zonas más altas de los declives situados al sur de la delegación.

La temperatura media anual es de 12°C, la máxima de 22°C y la mínima de -3°C.

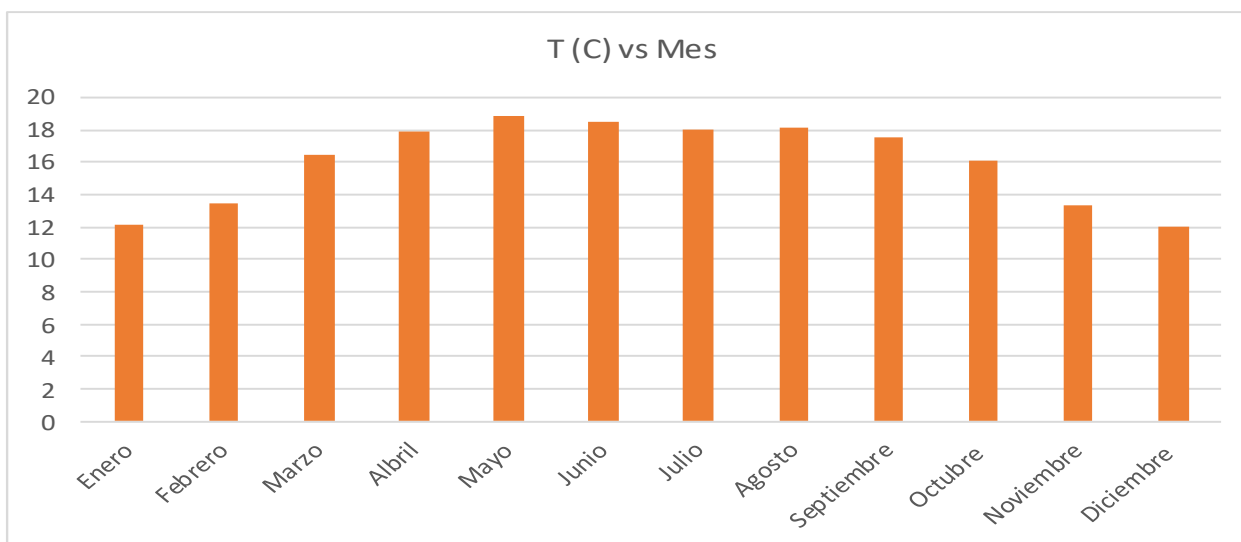
En la figura 4 se ubicaron las estaciones climatológicas más cercanas al pueblo de San Luis Tlaxialtemalco.



- Figura 4. Ubicación de las estaciones climatológicas más cercanas al poblado de San Luis Tlaxialtemalco Generado con ArcGis.

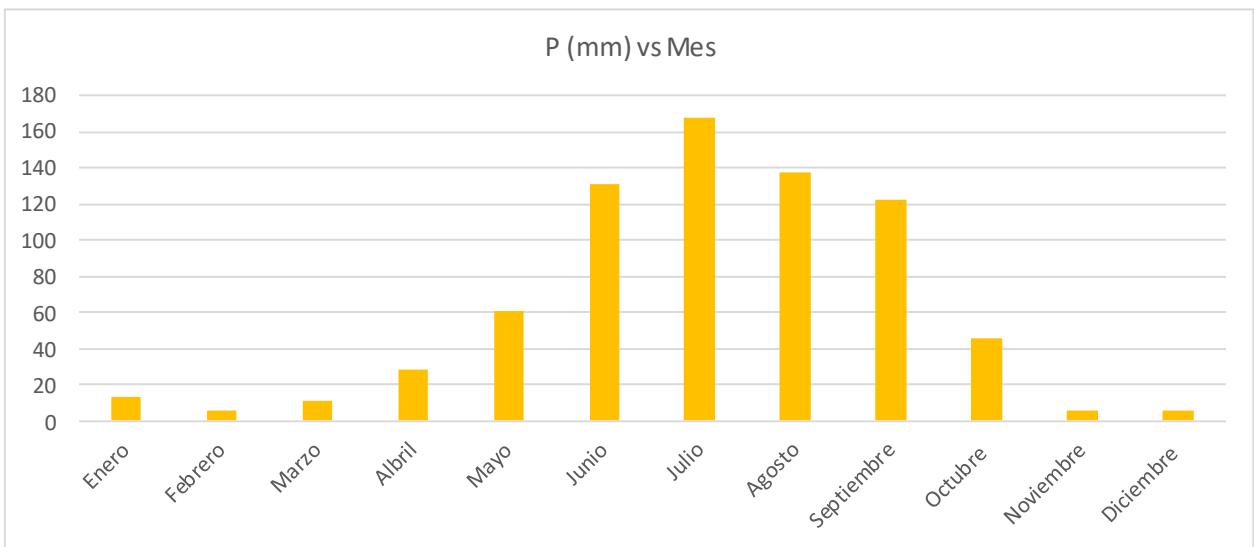
Tomando como base el cuaderno de Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana en la estación climatológica de San Gregorio Xochimilco Ciudad de México, el cual registro datos climatológicos de precipitación y temperatura promedio durante 15 años distribuidos en 12 meses se obtienen las siguientes tablas (Figura 5, 6):

Mes	T (C)
Enero	12.1
Febrero	13.5
Marzo	16.5
Abril	17.9
Mayo	18.9
Junio	18.5
Julio	18
Agosto	18.1
Septiembre	17.5
Octubre	16.1
Noviembre	13.4
Diciembre	12



- Figura 5. Tabla y gráfica de temperatura vs tiempo de datos obtenidos del cuaderno de Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.

Mes	P (mm)
Enero	13.5
Febrero	5.5
Marzo	11.5
Abril	28.1
Mayo	61
Junio	130.5
Julio	167.7
Agosto	137.2
Septiembre	122.3
Octubre	46.1
Noviembre	6.2
Diciembre	6.3



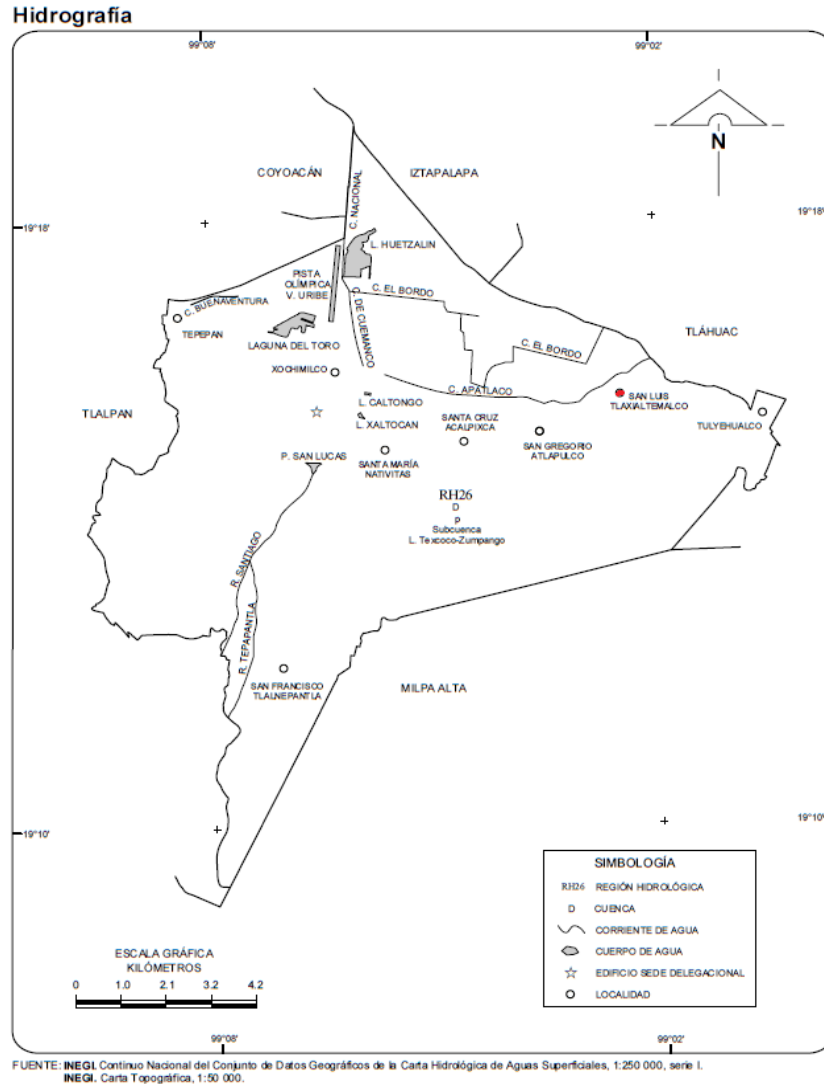
- Figura 6. Tabla y gráfica de precipitación vs tiempo de datos obtenidos del cuaderno de Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, la zona de Xochimilco presenta el clima tipo Cb (w1) (w) (i') g: es Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, temperatura del mes más caliente es de 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.



## 2.3 Hidrología

La hidrología de la cuenca de Xochimilco está condicionada por una red de arroyos de escurrimiento intermitente, la que es determinada por la permeabilidad de los suelos y el fracturamiento de las rocas (basaltos, andesitas y otros materiales de origen volcánico). El nivel máximo de escurrimiento se alcanza en el vaso lacustre, lugar en el que las aguas son drenadas artificialmente al Lago de Texcoco vía el Canal Nacional, para de ahí ser dirigidas al bajo de Nochistongo y finalmente salir a la cuenca del Pánuco (Figura 7).



- Figura 7. Canales y lagunas que existen en Xochimilco, entre ellos el Canal de Apatlaco que pasa al norte de San Luis Tlaxialtemalco.

Las principales corrientes que configuran la cuenca son: los arroyos San Buenaventura, Santiago, San Lucas y San Gregorio, así como numerosas y pequeñas corrientes que bajan a Nativitas, San Luis Tlaxialtemalco, Tulyehualco, Iztapalapa y Tláhuac, proviniendo, en los dos últimos casos del cerro de la Estrella y de la sierra de Santa Catarina.

Los escurrimientos, provienen actualmente de los cerros y volcanes que rodean el sur de la ciudad.

Los arroyos que bajan del volcán Teuhtli se dirigen a los poblados San Gregorio, San Luis Tlaxialtemalco y Tulyehualco, recargando los acuíferos de esta zona. En el recorrido de estos cauces, así como en el resto que alimentan el vaso lacustre de Xochimilco, se reciben las descargas domiciliarias que contaminan y azolvan estos cauces.

En el perímetro de la cuenca hay dos zonas de recarga acuífera importantes: la formación montañosa Ajusco-Chichinautzin-Tláloc y los cerros y volcanes de la sierra de Santa Catarina.

### **3. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

#### **3.1 Recopilación e integración de información**

La búsqueda, recopilación, organización y valoración de información bibliográfica fue necesaria para conocer el comportamiento, distribución y configuración de la estratigrafía de la zona.

- Se hicieron visitas al área de estudio, con ayuda de metodologías de reconocimiento y descripción, se destacaron y marcaron puntos clave dispersos por todo el poblado.
- Se realizaron entrevistas a personas de edad avanzada con el fin de tener una idea de cómo cambio la geomorfología, con ello podemos tener un panorama de los cambios significativos que ha sufrido a lo largo de su historia.
- Se utilizo la enciclopedia de municipios y delegaciones de la ciudad de México Xochimilco con el fin tener un panorama general de la información existente de la alcaldía de Xochimilco.
- Se utilizaron fragmentos de tesis referentes al tema hidrogeológico.
- Se utilizo el Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco, Distrito Federal, edición 2007. Mapas para observar la distribución regional de la alcaldía de Xochimilco.
- Se busco bibliografía acerca de las metodologías para realizar e interpretar una prueba de bombeo y se usó el manual de pruebas de bombeo de agua potable alcantarillado y saneamiento de la comisión nacional del agua.

## 3.2 Entrevistas

Se realizaron entrevistas a personas de edad avanzada con la finalidad de conocer el aspecto fisiográfico del pueblo años antes.

- **ENTREVISTA 1**

\*La zona de chinampas empezaban en la calle de Ahuehuete, Camelia y perpendicular a Camelia se encuentra la calle Jazmín que marcaba el límite de la zona chinampera. (Figura 8).

\*La calle de Floricultor, se rellenó con los sedimentos que fueron acarreados por el agua de lluvia que escurría desde el volcán Teuhtli.

\*Del acueducto hacia el sur se identifica que el suelo está compuesto por roca dura, hacia el norte es decir la parte más baja del pueblo empieza a aparecer sedimento no compactado (arena).

\*Las chinampas se rellenan año tras año con material orgánico (zacate y pasto) cuando termina la temporada de cultivo.

\*El drenaje del poblado fue construido por etapas, primero en la zona centro y después en la zona cerril.

\*La calle Miguel Hidalgo presentaba en el subsuelo material suelto (arena).

\*La actual calle El Rosal y Cuauhtémoc, era una zanja.

\*Al norte de la cerrada El Rosal hay material suelto (lodo).

\* Hace 30 años el ojo de agua abastecía al acueducto. (Figura 12).



- Figura 8. Se muestra la calle de Ahuehuete, Camelia y Jazmín que eran los límites entre el pueblo y las chinampas 30 años atrás. Imagen tomada de Google Earth.

- **ENTREVISTA 2**

\*La calle de Floricultor, era una antigua barranca de 2 m de ancho, la cual se fue rellenando de material que transportaba el agua principalmente de lluvia que escurría del Teuhtli.

\*Al norte de la calle Floricultor perpendicular al canal se encuentran los lavaderos y en esa zona aflora material no compactado (arenas).

\*En la Av. las Torres se encuentran macizos rocosos (Derrames de basalto).

\*Calle Horticultor y Magdalena Moreno hacia el sur presenta material “gris a café” no compactado, barranca más pequeña que Floricultor (suelo formado por depósito de la meteorización de basalto proveniente del Teuhtli).

\*En 1960 se perforaron los primeros pozos en la zona.

\*Al sur del Acueducto entrando a la zona cerril se encuentra el subsuelo compuesto por un macizo rocoso, el acueducto dejó de funcionar hace 20 años.

\*Las chinampas se rellenaron con material orgánico (pasto) año tras año desde la calle 16 de septiembre.

\*Cerca del actual mercado de las plantas existía un manantial con abundante agua (Figura 9).



Ubicación de antiguo manantial.

- Figura 9. Ubicación de un antiguo manantial cerca del ahora mercado de las flores. Imagen tomada de Google Earth.

- **ENTREVISTA 3**

\*En la calle de Xochitepetl al sur del acueducto se ubica una antigua barranca (Figura 10).

\*En el área existía una planta llamada chagual que actualmente ya no se encuentra.

\*En las chinampas hay materia orgánica debido al relleno, originalmente había rellenos de zacates etc.

\*El acueducto se construyó sobre una zona de macizos rocosos y esto se confirma al encontrar derrames prominentes en Av. de las Torres.

\*El subsuelo estaba conformado por arena blanca en la calle Acatempac.



Antigua barranca

- Figura 10. se muestra la ubicación de una antigua barranca en la calle de Xochitepetl Imagen tomada de Google Earth.

- **ENTREVISTA 4**

\*Persona de oficio Albañil con varios años de experiencia en la construcción de casas en la zona de San Luis Tlaxiátemalco, asegura que el límite entre los basaltos y la arena es justamente la zona donde se construyó el acueducto (Figura 11).



- Figura 11. límite de transición entre la zona sur de macizos rocosos y la zona norte de arenas. Imagen tomada de Google Earth.
- **ENTREVISTA 5 (Persona de 95 años, nos cuenta sus recuerdos de cuando tenía 9 años)**

\*La zona de chinampas empezaban de la ubicación de los lavaderos hacia el sur del pueblo de San Luis Tlaxialtemalco.

\* En la calle de Ahuehuate y Lázaro Cárdenas había un ojo de agua (Figura 12).

\*Se menciona que en la parte sur del pueblo se sembraba mucho maíz, calabaza etc. (suelo fértil característico de zonas volcánicas).

\*La hija de la entrevistada tiene 70 años y dice que cuando tenía 10 años empezaron a disminuir las lluvias.

\*Las casas construidas con zacate y techados a dos aguas (estructura ligera).

\* Principalmente en zonas de manantiales existían 7 llaves que suministraban de agua a todo el pueblo.

\* Se encontraba una noria cerca del mercado era con nivel somero (50 cm de profundidad).

\*La barranca que se encontraba en la calle de Floricultor creaba “encharcamientos” de 30–40 cm de profundidad, que desembocaba en el canal que delimita la zona centro y la zona chinampera que tenía con un ancho estimado de 3.5 m que es mayor al actual de 2 m.

\*Las lluvias disminuyeron mucho con el tiempo, hace aproximadamente 86 años sobre la barranca escurría gran cantidad de agua y las lluvias regularmente eran con granizo.



- Figura 12. En la calle de Ahuehuate y Lázaro Cárdenas había un ojo de agua. Imagen tomada de Google Earth.

### 3.3 Cartografía geológica

#### 3.3.1 Aspecto geológico

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México está conformada totalmente por rocas que se formaron durante la era Cenozoica, caracterizada por la predominancia de rocas volcánicas, mismas que dieron origen a las sierras que conforman la Faja Volcánica Transmexicana.

El poblado en el cual se localiza la zona de estudio (San Luís Tlaxialtemalco) pertenece a la porción Sureste Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, dicha área cuenta con una superficie de 2522 hectáreas aproximadamente, de las cuales la mayor parte corresponden a la zona de chinampas de Xochimilco y a los poblados de San Gregorio Atlapulco y San Luís Tlaxialtemalco.

Posteriormente aconteció principalmente el depósito de materiales de origen volcánico, y principalmente en la zona lacustre, materiales de origen aluvial y orgánico. Solo dos periodos de la era Cenozoica se encuentran presentes en el área de estudio, siendo estos el Paleogeno-Neogeno y el Cuaternario.

El territorio de la alcaldía Xochimilco está ubicado fisiográficamente dentro de la subprovincia número 57 de los lagos y volcanes Anáhuac, y a su vez pertenece a la



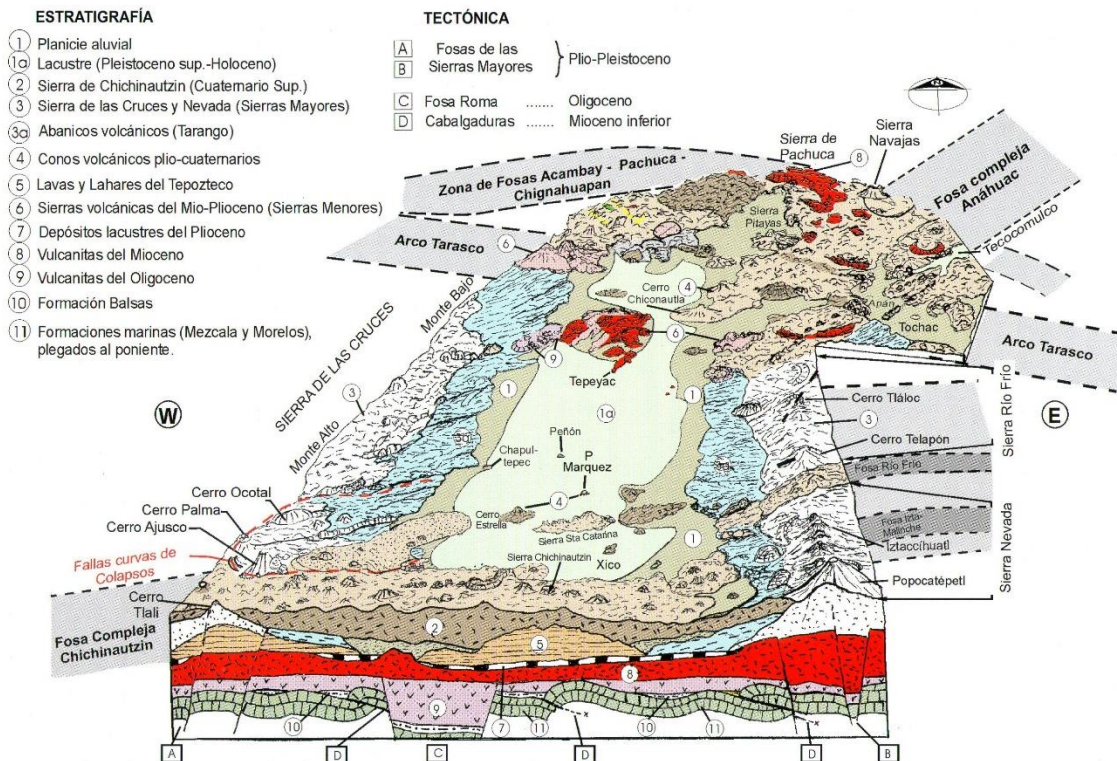
provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, en el extremo sur de la Cuenca de México (Figura 13).

El origen de esta zona se remonta al periodo Plio-Cuaternario; durante su formación, el extremo sur del Valle de México fue modificado debido a la formación de la sierra del Chichinautzin, evento que dio origen a la cuenca endorreica de México (Figura 13).

Geomorfológicamente la zona de estudio se encuentra en la parte sur del Área Natural Protegida, clasificada como pie de monte o zona de transición entre la zona montañosa y la zona lacustre, misma que se divide de sur a norte en llanura aluvial, llanura lacustre – salina y llanura lacustre.

Topográficamente la zona se ubica al pie del área montañosa conformada por los cerros Xochitepec y Cantil y los volcanes Teoca, Tzompole y Teuhtli.

Las rocas ígneas extrusivas presentes en el área de estudio afloraron durante los periodos mencionados anteriormente y están compuestas por lava que emana del volcán Teuhtli, posteriormente fue enfriada y solidificada sobre la superficie terrestre, y finalmente cubierta por la actual capa de suelo.



- Figura 13. Mapa que muestra la Geología y geomorfología de la cuenca del valle de México, imagen tomada del libro Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México.

## **4. GEOLOGÍA**

### **4.1 Estratigrafía**

La estratigrafía es la rama de la Geología que trata del estudio e interpretación, así como de la identificación, descripción y secuencia tanto vertical como horizontal de las rocas estratificadas; también se encarga de la cartografía y correlación de estas unidades de roca, determinando el orden y el momento de los eventos en un tiempo geológico determinado, en la historia de la Tierra.

#### **4.1.1 Objetivos**

Los objetivos de la estratigrafía son:

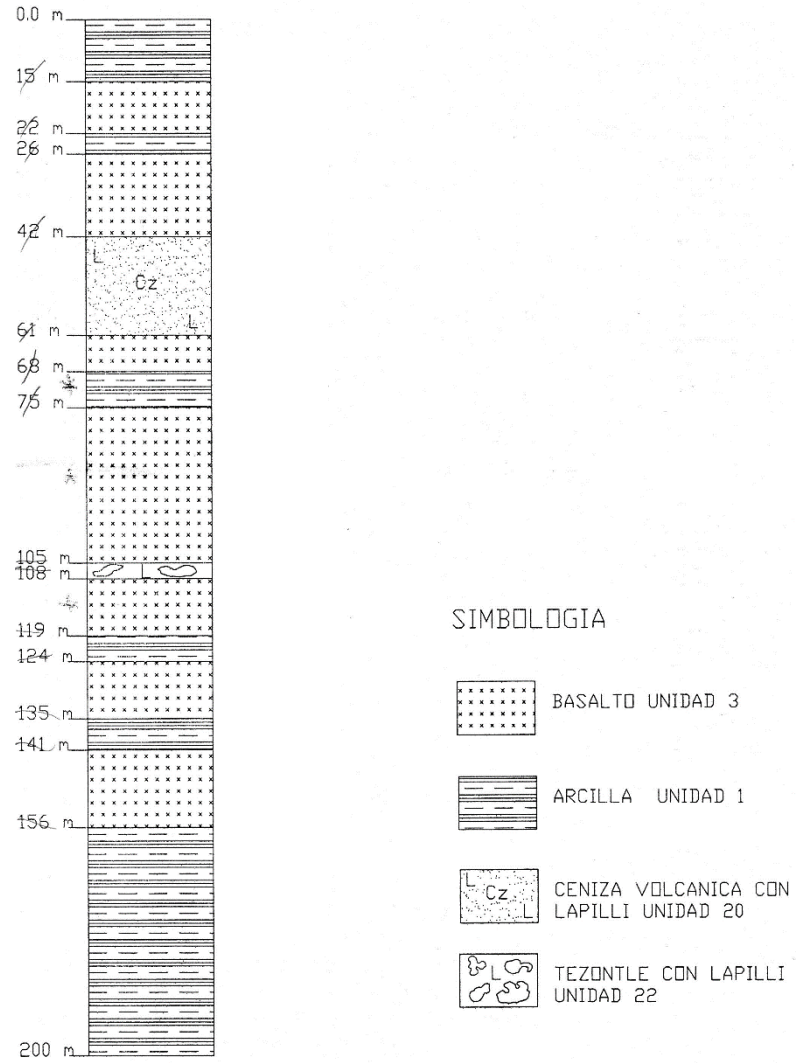
- Identificación de materiales
- Delimitación de unidades estratigráficas
- Ordenación de unidades estratigráficas
- Levantamiento de secciones estratigráficas
- Interpretación genética de las unidades
- Correlación y asignación de tiempo
- Análisis de cuencas

A continuación, se presentan los cortes litológicos de los pozos 4, 7 y 10, los cuales fueron pilares importantes para la correlación estratigráfica que se muestra más adelante (Figura 14, 15, 16).

Así como la columna estratigráfica que se identificó en San Luis Tlaxialtemalco realizada con información de cortes litológicos de pozos distribuidos por todo el pueblo (Figura 17).

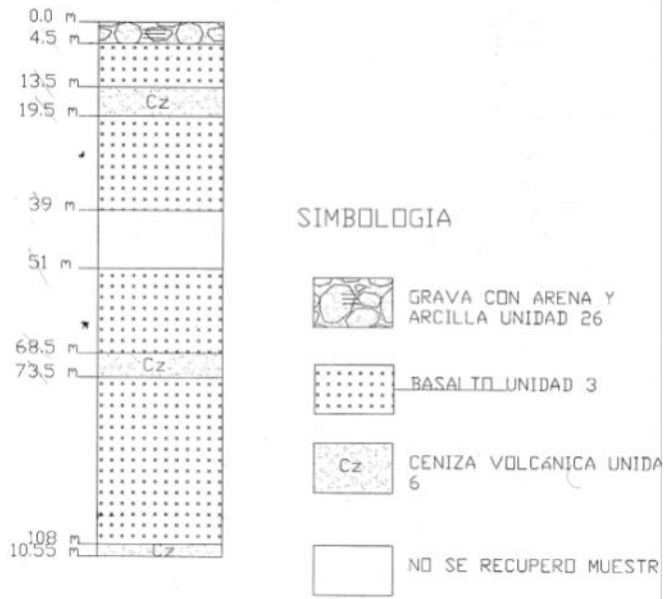
A su vez se realizó una correlación estratigráfica con los cortes litológicos 4, 7 y 10 que muestra el comportamiento estratigráfico del subsuelo (Figura 18).

POZO SAN LUIS 4  
2253 M



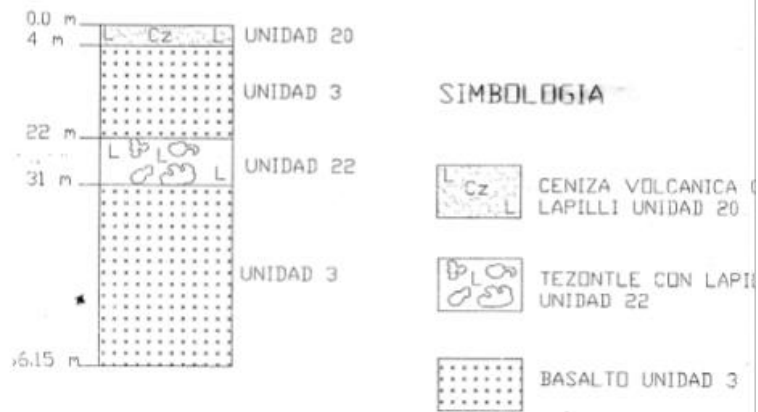
• Figura 14. Corte litológico del pozo San Luis 14

POZO SAN LUIS 7  
2264 M



• Figura 15. Corte litológico de pozo San Luis 15

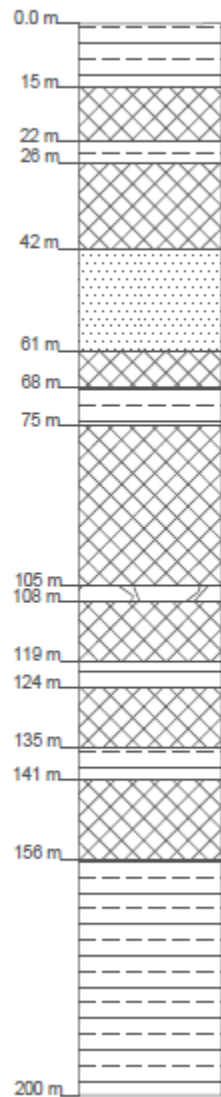
POZO SAN LUIS 10  
2266 M



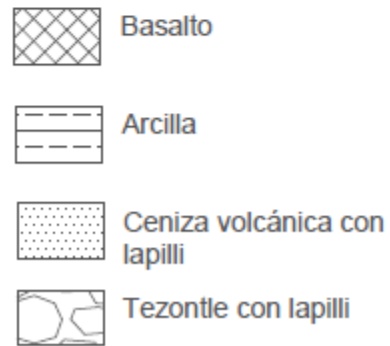
• Figura 16. Corte litológico del pozo San Luis 16.

Columna estratigráfica en  
San Luis Tlaxialtemalco,  
Alcaldía Xochimilco,  
Ciudad de México.

2253 msnm.



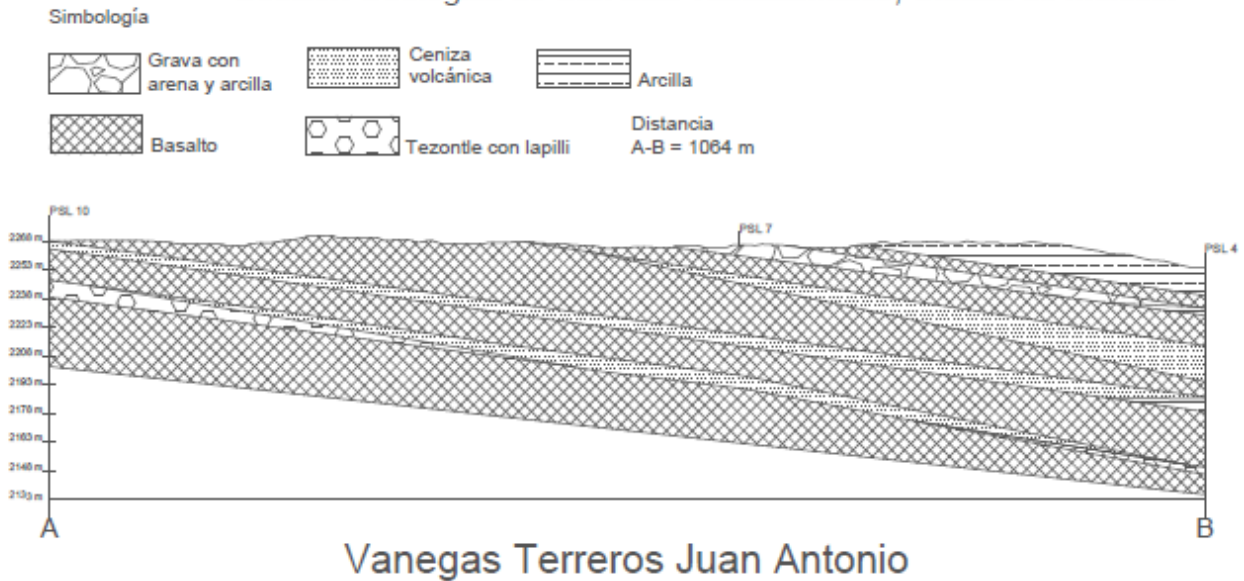
Simbología



Vanegas Terreros Juan Antonio

- Figura 17. Columna estratigráfica realizada con la información recolectada de los cortes litológicos de los pozos San Luis Tlaxialtemalco, 4, 10, 7. (En la columna estratigráfica se muestran las diferentes litologías presentes en el área de estudio, así como sus respectivos espesores).

## Sección Geológica de San Luis Tlaxialtemalco, Ciudad de México.



- Figura 18. Esta correlación estratigráfica fue realizada con los cortes litológicos de los pozos San Luis Tlaxialtemalco 10, 7 y 4 en el pueblo de San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco, Ciudad de México.

## 4.2 Análisis estructural

### 4.2.1 Sismo del 19 de septiembre en la ciudad de México

Mucho nos preguntamos si el sismo, de magnitud 7.1, fue más fuerte en la Ciudad de México que el terremoto de magnitud 8.0 de 1985. Sólo por la enorme diferencia en magnitud de los dos eventos, uno podría suponer que no.

Esto tiene sentido, ya que el sismo de 1985 liberó 32 veces más energía sísmica que el del 19 de septiembre de 2017. Sin embargo, en 1985, el epicentro fue muy lejano y bajo las costas del estado de Michoacán, a más de 400 km de la capital, mientras que el 7.1 ocurrió apenas 120 km al sur de la ciudad.

Al propagarse, las ondas sísmicas se atenúan rápidamente. Por ello, a pesar de que la ruptura que generó las ondas sísmicas el martes 19 de septiembre es mucho menor que la de 1985, las sacudidas en la Ciudad de México fueron tan violentas. A continuación, veremos porqué.

¿Dónde y por qué ocurrió el sismo?

La ruptura del sismo del 19 de septiembre de 2017 ocurrió dentro de la placa oceánica de Cocos (i.e. sismo intraplaca), por debajo del continente, a una profundidad de 57 km. Si

bien este tipo de sismo no es el más común en México, de ninguna manera es extraordinario.

Es preciso mencionar que estudios realizados para sismos intraplaca en México muestran que, por año, la probabilidad de que la intensidad de las sacudidas en la Ciudad de México debidas a este tipo de terremotos sea grande es muy similar a la de los sismos típicos de subducción, como el de 1985, entre otros.

Sin embargo, todos sabemos que gran parte de la Ciudad de México está edificada sobre sedimentos blandos de los antiguos lagos que existieron en el valle. Estos sedimentos provocan una enorme amplificación de las ondas sísmicas en la Ciudad de México que, probablemente, sea la más grande.

¿Por qué los daños se concentraron en ciertas zonas de la ciudad?

La violencia del movimiento del suelo en la Ciudad de México depende principalmente del tipo de suelo donde nos encontremos. Como ya se dijo, gran parte de la ciudad está asentada en suelo blando, sobre sedimentos lacustres.

La mayoría de los daños se encuentran al oeste de la cuenca sedimentaria, sobre la zona de transición y parte del suelo blando, muy cerca de su límite poniente. Ahí, los sedimentos tienen un espesor de 10 a 30 m. La interacción y amplificación de las ondas sísmicas con esta región de la cuenca sedimentaria provocaron los daños.

¿Los daños se debieron a deficiencias en el reglamento de construcción?

No tenemos hasta el momento indicios de que las fuerzas de diseño (i.e. los criterios de resistencia estructural) actualmente vigentes en el reglamento de construcción de la Ciudad de México se hayan excedido durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Por lo tanto, los edificios construidos en los últimos años no deberían haber sufrido daños.

Sin embargo, en el caso de estructuras comunes, el Reglamento de Construcciones de la ciudad no exige que las edificaciones antiguas sean reforzadas para resistir las fuerzas especificadas en las normas emitidas después de su fecha de construcción. Es posible, entonces, que en el caso de edificaciones antiguas sí se hayan excedido las fuerzas de diseño con las que fueron proyectadas.

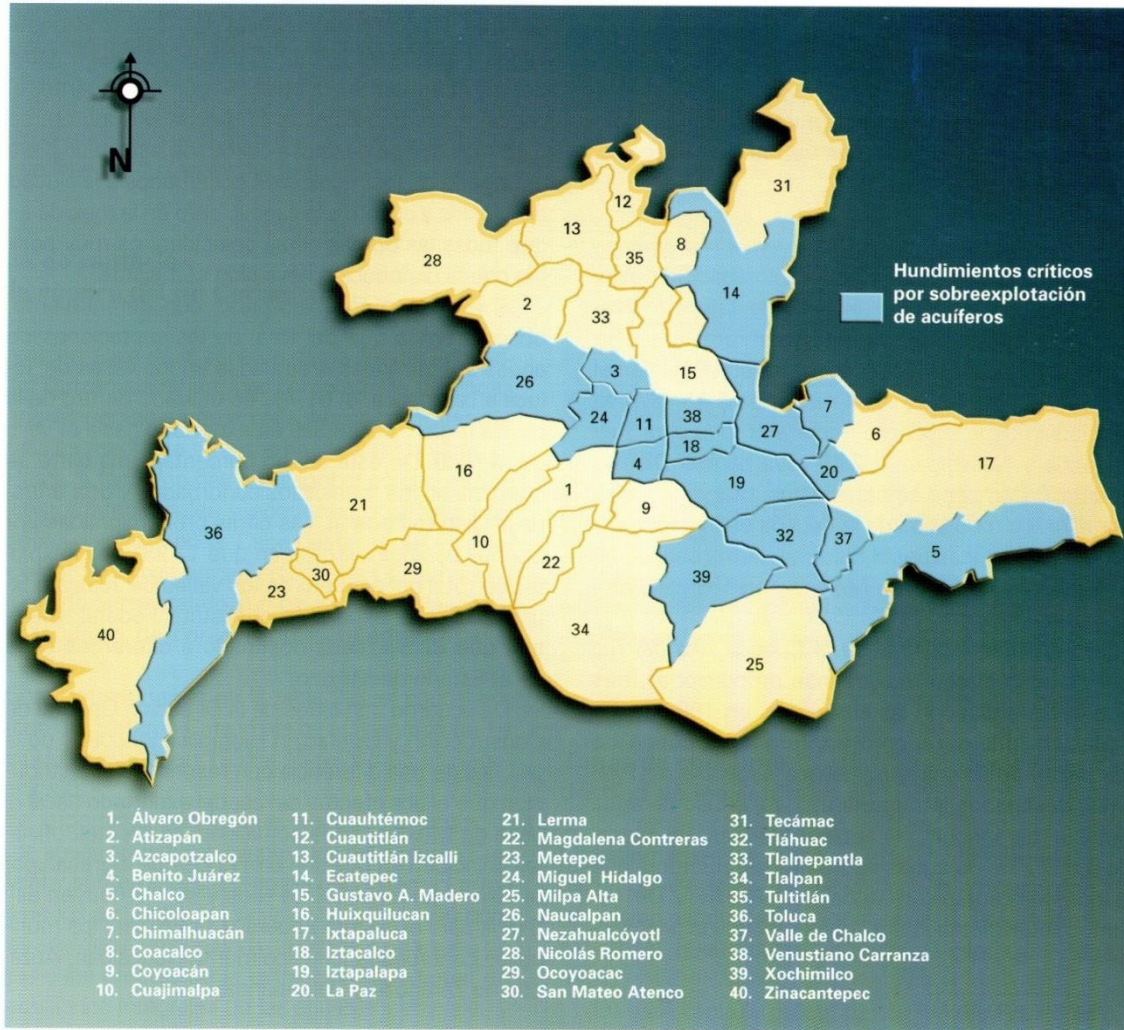
Independientemente de lo anterior, se sabe que existe un grave problema por falta de cumplimiento de las normas especificadas en el reglamento vigente de construcción, documentado en proyectos de investigación realizados en la UNAM. En consecuencia, los daños observados se explican mejor con la falta de observancia de las normas, más que por posibles deficiencias en el Reglamento de Construcción actual.

¿Esperamos un sismo de mayor intensidad en la Ciudad de México?

Es muy probable. Bajo las costas del estado de Guerrero, por ejemplo, existe una brecha sísmica (i.e. segmento donde no ha ocurrido un terremoto significativo en más de 60 años) de 250 km de longitud en dónde podría ocurrir un sismo de magnitud superior a 8.

Además del sismo, el sobrebombeo es la causa principal del hundimiento en la ciudad de México (Figura 19, figura 20).

Municipios y delegaciones con mayores hundimientos



Fuente: DDF-DCGOH, 1997, GEM-CNA, 2002.

- Figura 19. Este mapa representa los Hundimientos críticos por sobreexplotación de acuíferos en las alcaldías de la ciudad de México y municipios del estado de México, y Xochimilco está señalada como Hundimiento crítico. Imagen tomada del libro Guerra por el agua en el valle de México.





- ACLARACIONES:**
- 1.- Las curvas de igual asentamiento están en centímetros por año
  - 2.- La posición de las curvas es sólo aproximada
  - 3.- G.A.V.M. : Gerencia de Aguas del Valle de México

- Figura 20. Mapa que representa las curvas de igual hundimiento anual medidas en cm de los años 1985 a 1995. Imagen tomada del libro Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México.

Posterior al sismo del 19 de septiembre de 2017, se llevaron a cabo actividades tales como los caminamientos para obtener datos estructurales de fracturas, así como la ubicación de socavones distribuidos en todo el pueblo, también se identificaron áreas donde hubo derrumbes de casas-habitación etc., dicha información se presenta a continuación.

#### 4.2.2 Caminamientos N-S, E-W

Se realizaron visitas a la zona, en donde se utilizaron técnicas descriptivas y se registraron las características generales de las grietas mediante caminamientos N-S y E-W georreferenciadas.

Para ubicar los puntos de agrietamiento y hundimiento, se usó un mapa topográfico que contiene la traza urbana de la localidad, donde se definieron: 3 divisiones para el pueblo de San Luis Tlaxialtemalco las cuales son:

Zona I Cerril, Zona II Transición, Zona III Lacustre.

Se realizó una base de datos priorizando orientación de las fracturas verticales distribuidas por todo el pueblo, con claves de tipo SLTp (San Luis Tlaxialtemalco punto)

- SLTp1 (14Q 0496068, 2129727) Punto de inicio para recorrido N-S, se empieza en canal que divide la zona chinampera con la zona centro de San Luis Tlaxialtemalco como se observa en la figura 21.



• Figura 21. Inicio del caminamiento N-S.

- SLTp2 (14Q 0496029, 2129538)

En la calle Magdalena Moreno y la calle Agricultor se presenta una grieta vertical con dirección 280°.

- SLTp3 (14Q 0496026, 2129491)

En la calle de Camelia y Agricultor la calle presenta una inclinación  $275^{\circ}$  de este-oeste.

- SLTp4 (14Q 0496000, 2129356)

Casa derrumbada posible motivo, inclinación de predio, en el centro del lugar, el piso presenta hundimiento hacia el centro de la coladera, se encontró una sucesión de grietas paralela, la más grande es en orientación N-S y tiene de longitud 8.75 m, se inclina hacia el sur y también hay grietas perpendiculares.

- SLTp5 (14Q 0496062, 2129078)

Acueducto (toda la calle de acueducto no presenta afectaciones posteriores al sismo)

- SLTp6 (14Q 0496110, 2129715)

Se realizan trabajos de alcantarillado y había una zanja a 2.6 m y se presentan suelo de tipo arcilla.

- SLTP7 (14Q 0496201, 2129566, 2190 m)

Existe una grieta que atraviesa la calle de Miguel Hidalgo entre las calles de Agricultor y Floricultor, grieta orientada este-oeste.

- SLTp8 (14Q 0496203, 2129502, 2266 m)

En la figura 22 se observa la calle de Magdalena Moreno en donde los pobladores mencionan que se rompió la tubería del alcantarillado y el centro de la calle se empezó a hundir y las casas están apuntaladas debido a la inclinación que sufrió.



- Figura 22. Hundimiento en la calle Magdalena Moreno.

- SLTp9 (14Q 0496184, 2129498, 2283 m)

En las figuras 23, 23-1 se observa un socavón y agrietamiento de pared N-S perpendicular al movimiento del sismo sobre la calle de Cuauhtémoc y Magdalena Moreno.



- Figura 23. Agrietamiento N-S



- Figura 23-1. Socavón rellenado por pobladores.

- SLTp10 (14Q 0496276, 2129495, 2252 m)

En la figura 24 se observa el límite N-S en donde la calle no tuvo afectaciones, desde la calle de Año de Juárez a Magdalena Moreno entronque con calle Horticultor, en este punto, por lo visto de manera preliminar el tipo de suelo es diferente a la arcilla, esto se infiere por la falta de grietas y afectaciones en las calles y casas.



- Figura 24. Calle de Horticultor entre Magdalena Moreno y Año de Juárez sin afectaciones.

- SLTp11 (14Q 0496251, 2129691, 2227 m)

En la figura 25 observamos un predio en donde había una casa que fue completamente afectada por el sismo y posteriormente derrumbada, los pobladores mencionan que a 30 cm de profundidad encontraron agua, la calle fue rellenada, los pobladores dicen que se rellenó de “tierra y una menor parte de cascajo de concreto” se llega a la conclusión de que el material de relleno es “grava con arena y arcilla” (conclusión del testimonio de los pobladores).



- Figura 25. Predio donde se derrumbó una casa.

- SLTp12 (14Q 0496365, 2129521, 2241 m)

Como se observa en la figura 26, en el callejón perpendicular a la calle de Olivo se presentan grietas que se orientan  $247^{\circ}$ , se presenta una grieta de profundidad 3 cm, 0.5 cm de abertura, y 1m de largo.



- Figura 26. Grieta con orientación  $247^{\circ}$

- SLTp13 (14Q 0496356, 2129530)

Calle 16 de septiembre encontramos una grieta con abertura de 3 cm y 7 cm de profundidad, longitud de 13 m, con  $87^{\circ}$  (Figura 27).



- Figura 27. Grieta con orientación  $87^{\circ}$ .

- SLTp14 (14Q 0496235, 2129626, 2239 m)

Socavón de 6.4 m de longitud, este socavón fue rellenado con arcilla y cascajo de concreto, el socavón esta precisamente entre dos coladeras de drenaje y una de agua potable como se observa en la figura 28.



- Figura 28. Socavón rellenado.

- SLTp15 (14Q 0496300, 2129584, 2230 m)

Se encuentra un socavón sobre la calle Horticultor entre Hidalgo y 16 de septiembre, con una profundidad de 47.5 cm y 11.5 cm de diámetro como se observa en la figura 29.



- Figura 29. Socavón con profundidad de 47.5 cm.

- SLTp16 (14Q 0496289, 2129588)

En la calle Miguel Hidalgo se identificó una familia de grietas paralelas que la atraviesan en sentido Este-Oeste, una de ellas presenta aberturas de 2.5-3 cm y 48 m de longitud, profundidad de 45.5 cm con inclinaciones de  $4^{\circ}$  a  $6^{\circ}$ , como se observa en la figura 30, una segunda grieta paralela a la anterior tiene una profundidad de 32 cm como se observa en la figura 30-1), una tercer grieta presenta 6.5 cm de desplazamiento de escalón y profundidad mayor a 92 cm, las grietas se inclinan hacia el norte franco hacia la parte más baja, como se observa en la figura 30-2, a su vez una cuarta grieta con escalón de 8 cm, y con profundidad mayor a 92 cm así como una inclinación al norte franco como se observa en la figura 30-3, en esta misma calle entre Cuauhtémoc y Floricultor se presenta un hundimiento diferencial con inclinación al norte como se observa en la figura 30-4.





- Figura 30. Grieta con orientación Este-Oeste en la calle Miguel Hidalgo.



- Figura 30-1. Grieta con 32 cm de profundidad.



- Figura 30-2. Grieta presenta 6.5 cm de desplazamiento vertical y profundidad mayor a 92 cm.



- Figura 30-3. Grieta con desplazamiento vertical de 8 cm.



- Figura 30-4. Calle con hundimiento diferencial.

- SLTp17 (14Q 0496021, 2129523, 2262 m) Como se observa en la figura 31 se encuentra una grieta con profundidad de 48 cm entre las calles de Magdalena Moreno y Agricultor.



- Figura 31. Grieta con profundidad de 48 cm.

- SLTp18 (14Q 0495922, 2129531, 2243 m)

En este punto encontramos un manantial natural de agua potable dentro de una zona privada, no fue posible entrar a visitarlo.

- SLTp19 (14Q 0496003, 2129483, 2237 m)

Calle Camelia presenta inclinación de 3° al NE fotografía SLTp19-1 (Figuras 32, 32-1).



- Figuras 32. Calle con inclinación de 3° al NE.



- SLTp20 (14Q 0495976, 2129562, 2239 m)
- Figura 32-1. Calle con inclinación de 3° al NE.

En la calle de Jazmín entre Camelia y Hortensia se identificó una grieta con apertura de 3 cm, la grieta recorre la calle de Hortensia hasta Jazmín como se observa en la figura 33.



- Figura 33. Grieta con apertura de 3 cm.

- SLTp 21 (14Q 0495607, 2129430, 2234 m)

Calle prolongación Lázaro Cárdenas perpendicular la calle Caucontle se encuentra una grieta con orientación  $102^{\circ}$ , con 2 cm de apertura y 3 cm de profundidad, y una longitud de 10 m, 4.5 cm de desplazamiento vertical y una inclinación de  $9^{\circ}$ , en una distancia de 24 cm como se observa en la figura 34.



- Figura 34. Grieta con orientación  $102^{\circ}$ .

## ZONA CERRIL

- SLTp22 (14Q 0496332, 2128449, 2329 m)

En la calle Exotitla barrio de la Guadalupe, se encuentra una excavación en donde afloraba una intercalación entre, suelo posiblemente resultado de erosión del basalto que se encuentra en las faldas del volcán Teuhtli y bloques de basalto de diámetros aproximados de 5 m como se observa en la figura 35, 35-1.



- Figura 35. Excavación en predio donde afloran bloques de basalto intercalado con suelo producto de la erosión del basalto



- Figura 35-1. Suelo posiblemente resultado de erosión del basalto.



- SLTp23(14Q 0496332, 2128449, 2329 m)

Punto más alto de San Luis Tlaxialtemalco, termina el pueblo y empiezan las veredas, también se localizó un escarpe donde se observan rocas de tipo basálticas, como se aprecia en la fotografía y además tenemos una fotografía de la parte más alta visando el pueblo de San Luis Tlaxialtemalco, también se encontraron terrazas que se utilizan para cultivo y evitar deslaves del suelo, nos mencionan que el resto del área está fincado (Figuras 36, 36-1).



- Figura 36. Escarpe con rocas de tipo basálticas.



- Figura 36-1. Punto más alto de la zona de estudio.

## **ZONA LACUSTRE (De manera general en toda la zona lacustre)**

- SLTp24 (14Q 0496324, 2130174)

De forma general en toda la zona lacustre se encontró:

- \*Ojo de agua a lado de pozos 3, 4, 5 en el parque.
- \*Canal nacional ahora canal de Caltongo cerrado parcialmente para retener agua.
- \*3 m de profundidad en el 2000 en el canal ahora 2 m.
- \*Puente 1 sobre canal nacional, al otro puente hay un metro de desnivel.
- \*En 1988 se crean los primeros pozos artesanos sobre canal de Chalco a la altura de ejido de san Gregorio y en 1992 se empiezan a trabajar.
- \*En 2017 hubo una inundación por causas antropogénicas y en 1935 fue por causas naturales.
- \*Las chinampas están rellenas con trozos de ramas, sauce llorón y tule triangulado.
- \*Los canales que abastecen a las chinampas son de agua tratada mandadas desde la planta de tratamiento que funciona en la parte sur del pueblo (Figura 37, 37-1).
- \*En 1962 se secó el ojo de agua.
- \*Existen pozos a 216 m de profundidad.
- \*Pozo sobre canal de Chalco que se llamaba viveros de Netzahualcóyotl.
- \*El ojo de agua fue relleno por cascajo.
- \*Se crearon zanjas para poder distribuir el agua debido a que el desnivel no permitía que fluyera.
- \*Paraje ojo de agua tenía 20 m de circunferencia.



- Figura 37. Se muestra el canal que abastece a las chinampas con agua tratada.



- Figuras 37-1. Se muestra el canal que abastece a las chinampas de agua tratada.

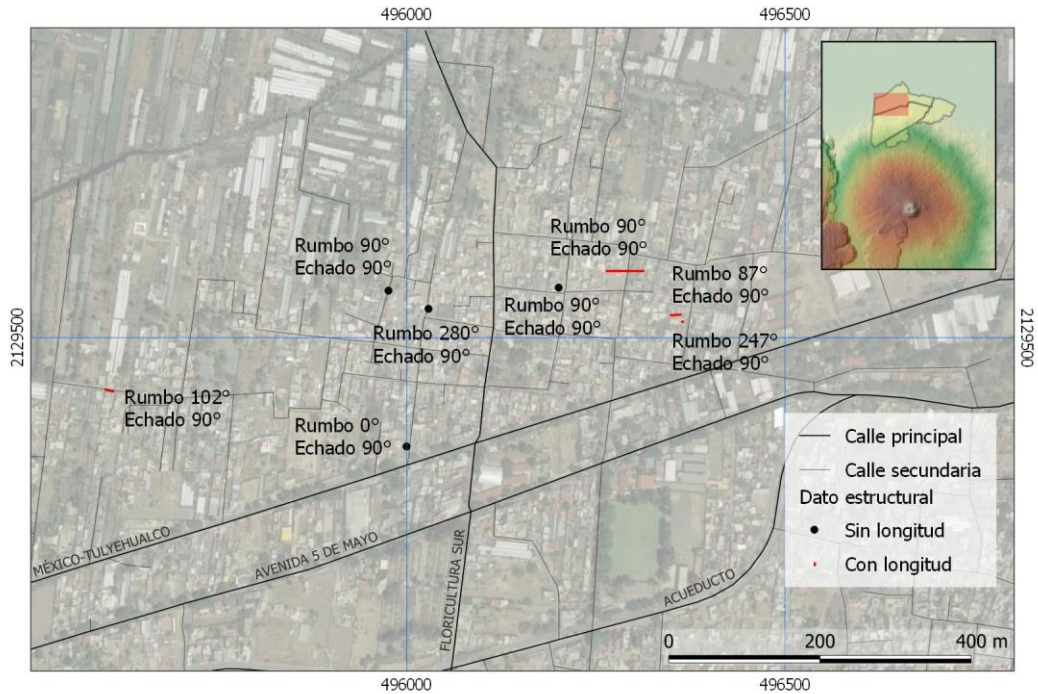
### 4.2.3 Proyecciones estereográficas

La proyección estereográfica es un tipo de proyección azimutal muy usado en cristalografía y geología estructural para establecer la relación angular existente entre las caras de los cristales o entre las estructuras geológicas. Todas las proyecciones permiten la representación de objetos tridimensionales en una superficie de dos dimensiones. Cualquiera que sea el sistema de proyección elegido, la representación plana presenta deformaciones que pueden ser lineales, angulares y superficiales. Dependiendo de la finalidad de la representación elegiremos uno u otro tipo de proyección. Por ejemplo, nos puede interesar que los ángulos se proyecten en verdadera magnitud, aunque las magnitudes lineales y superficiales sufran deformaciones en mayor o menor grado.

Se realizaron caminamientos en la zona lacustre, en la zona centro y en la zona cerril en sentidos norte sur y este oeste, con estos caminamientos se midieron datos estructurales de fracturas verticales las cuales se presentan en la tabla de la figura 38.

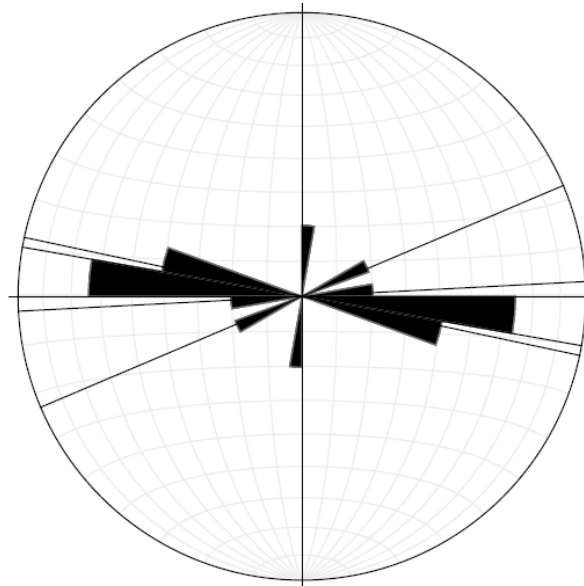
ubicación de fracturas (GPS)	Rumbos	Observaciones
14Q 0496029, 2129538	280,90	En la calle Magdalena Moreno y la calle Agricultor se presenta una fractura con dirección 280.
14Q 0496000, 2129356	0,90	
14Q 0496201, 2129566	90,90	Existe una fractura que atraviesa la calle de Miguel Hidalgo entre las calles de Agricultor a Floricultor.
14Q 0496365, 2129521	247,90	Se presenta una fractura de profundidad 3 cm y 0.5 cm de abertura con 1 m de largo.
14Q 0496356, 2129530	87,90	Calle 16 de septiembre encontramos una fractura con abertura de 3 cm y 7 cm de profundidad, longitud de 13 m.
14Q 0496289, 2129588	90,90	Fractura con aberturas de 2.5 -3 cm y de longitud a 48 m, atraviesa toda la calle y una profundidad de 45.5 cm.
14Q 0495976, 2129562	90,90	
14Q 0495607, 2129430	102,90	Fractura con 2 cm de abertura y 3 cm de profundidad promedio (posiblemente fue rellenada), y una longitud de 10 m.

- Figura 38. Resumen los datos estructurales de fracturas verticales, obtenidos de los caminamientos N-S, E-W.



- Figura 39. Los datos estructurales resultado de los caminamientos en la zona lacustre, en la zona centro y en la zona cerril en sentidos norte sur y este oeste son representados en el modelo realizado en QGis.

También dichos datos fueron graficados con ayuda del programa Stereonet en una roseta estructural como se muestra en la figura 40.



- Figura 40. Representación en red estereográfica de las fracturas verticales medidas en campo.

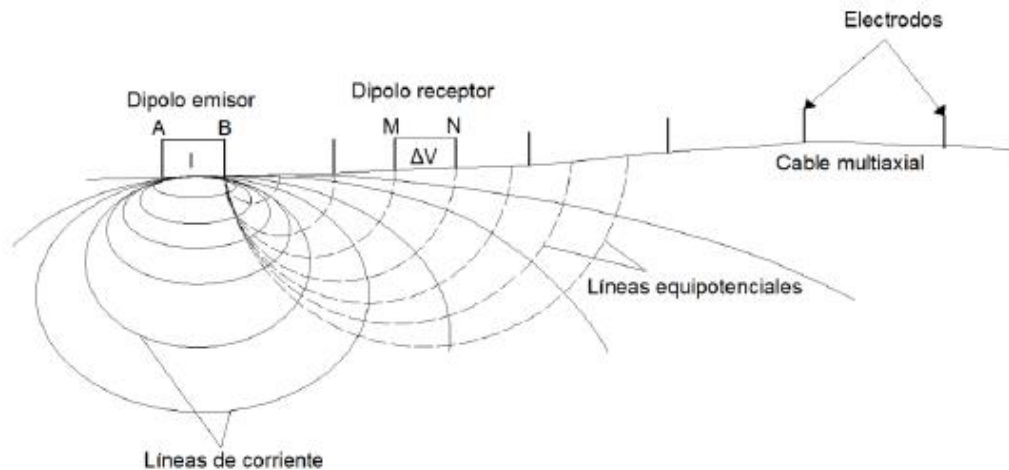
La red estereográfica presenta una orientación preferencial que es NW-SE la cual coincide con la orientación de las tuberías de drenaje por lo que se infiere que dichas facturas pudieron haber sido causadas por un mal aplanado del terreno al momento de su construcción o por la fuga de agua en el cople que une las tuberías.

## 5. GEOFÍSICA

### 5.1 Exploración geofísica

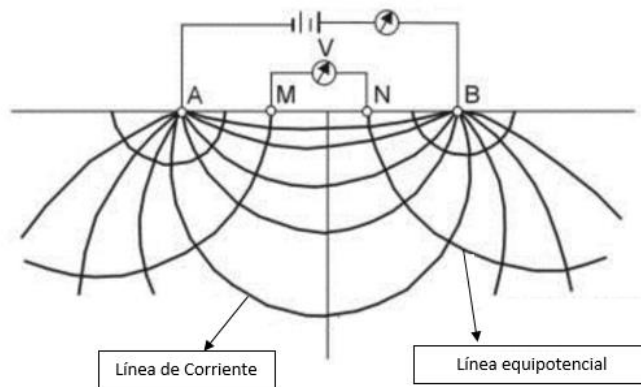
#### 5.1.1 Fundamentos teóricos

La TRE (Tomografía de resistividad eléctrica) es un método geofísico cuyo objetivo fundamental es investigar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo inyectando una corriente eléctrica continua mediante una fuente artificial, el método se basa en la generación de un campo eléctrico, el cual circula mediante los electrodos de corriente (A y B), en los cuales se inyecta una cantidad de corriente determinada al subsuelo, posteriormente se mide la diferencia de potencial eléctrico mediante los electrodos de potencial (M y N) (Figura 41).



- Figura 41. Modelo Geoelectrico de corriente continua

Aplicando la Ley de Ohm, la cual dice que debido a la existencia de materiales que dificultan el paso de la corriente eléctrica a través de los mismos el valor de la tensión o voltaje es directamente proporcional a la intensidad de la corriente, se determina que esta diferencia de potencial se ve afectada por las resistividades de los distintos materiales del subsuelo que atraviesa el campo eléctrico (Figura 42).



- Figura 42. Representación Gráfica de los electrodos de potencial y de corriente (arreglo Wenner Schlumberger)

Para hacer un análisis de las corrientes eléctricas que circulan a través del subsuelo se emplean las leyes físicas que las rigen, teniendo en cuenta que se contempla a la Tierra como un semiespacio homogéneo con resistividad, como ya se mencionó anteriormente, al inyectarse una corriente eléctrica al subsuelo, esta genera un campo eléctrico.

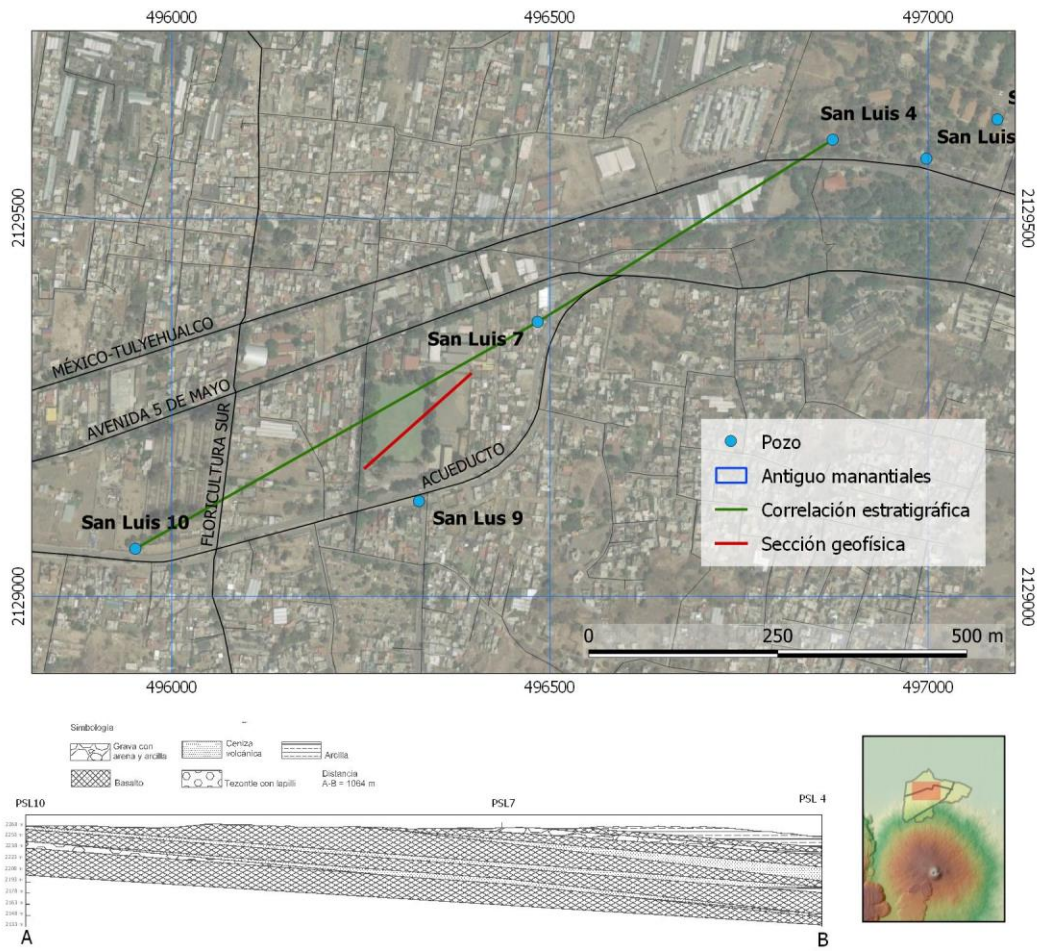
### 5.1.2 Profundidad de investigación y función de sensibilidad

En los estudios de resistividad, un concepto de suma importancia es el de profundidad de investigación, mismo que fue introducido por Marcel Schlumberger y Conrad en 1932. La profundidad a la cual un método de resistividad permite llegar, depende de la disposición de los electrodos de potencial y de corriente, cabe mencionar que dicha profundidad no guarda una relación directa con la profundidad de la penetración de la corriente, la cual está determinada por la distancia entre los electrodos de corriente Barker, (1989).

## 5.2 Descripción de la zona de estudio

El estudio geofísico realizado por José Antonio Barrera Mendoza en su tesis “Empleo del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica para la ubicación de un sitio de recarga de acuífero en Xochimilco” propone una composición litológica con la cual asocio sus resultados con mis resultados obtenidos de la información de correlación estratigráfica que defino a partir de los cortes litológicos de los pozos San Luis 4, 7, y 10 (Figura 18).

El estudio se llevó a cabo en un par de canchas de fútbol soccer localizadas en la esquina que forman las calles Acueducto y Calvario en el poblado de San Luis Tlaxialtemalco. Las coordenadas UTM son las siguientes: Zona 14 Q, coordenada Este: 496300.33 mE, coordenada Norte: 2129229.26 mN y una altura aproximada de 2220 m sobre el nivel medio del mar (Figura 43).



• Figura 43. Localización de zona de estudio geofísico en el poblado de San Luis Tlaxiátemalco. Modelo realizado en QGis.



### 5.3 Adquisición de datos TRE

Para ello fue necesario ubicar un lugar adecuado, el cual fuese representativo del total de la zona de estudio, esto con la finalidad de obtener una buena caracterización del subsuelo, en la figura se muestra la línea que se eligió para el estudio. Dicha línea fue elegida por ser la de mayor longitud dentro del área de interés (Figura 44).

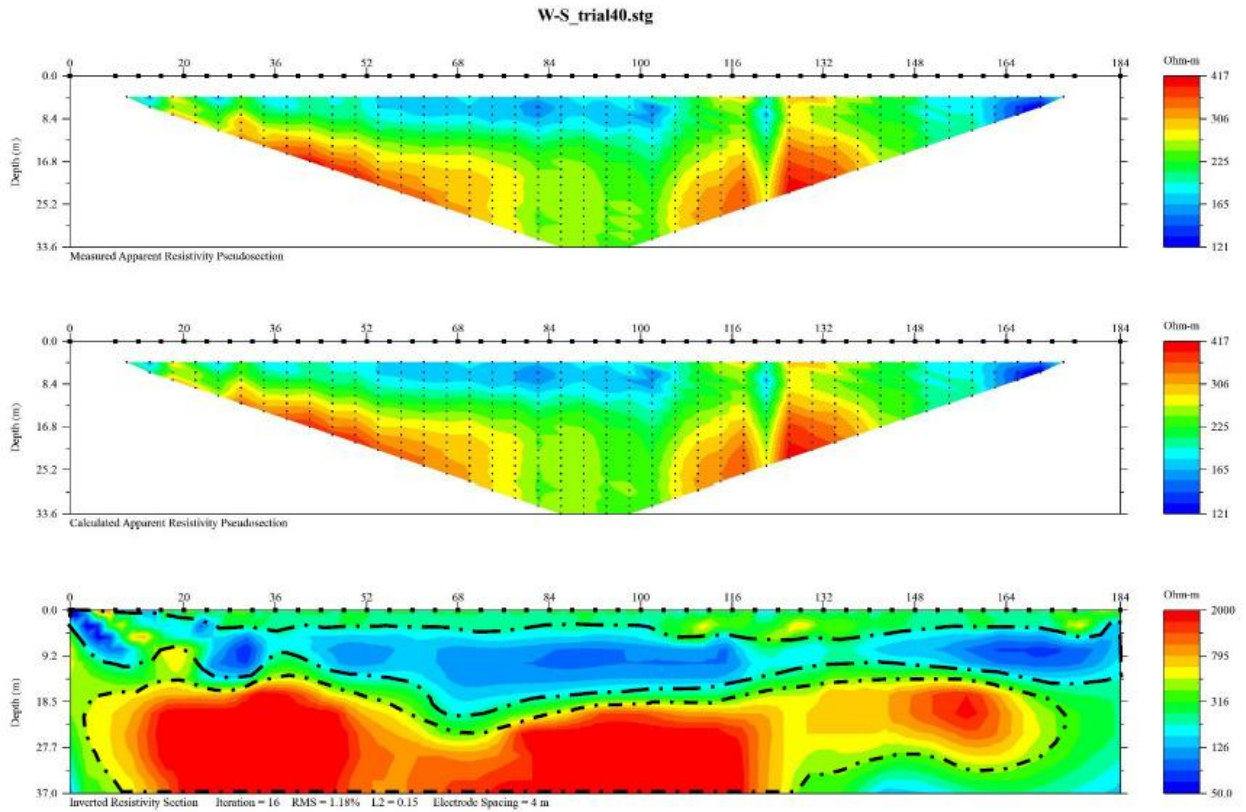


- Figura 44. El levantamiento fue realizado en dos campos de futbol soccer que forman parte del deportivo de San Luis Tlaxialtemalco en el mes de junio del 2014

El trabajo de campo para llevar a cabo la TRE tuvo una duración de dos días, en el primero se realizó una visita al lugar con la finalidad de encontrar la zona más pertinente para el estudio y también hacer revisiones a cerca de los permisos necesarios para la colocación de los electrodos. El segundo día se llevó a cabo la TRE, ya con la línea ubicada se procedió a colocar el equipo de medición, y posteriormente se llevó a cabo esta última. Se realizó una línea de perfil eléctrico con dirección  $49^\circ$  NE/SW y una longitud de 192 m aproximadamente.

Se emplearon los arreglos Wenner – Schlumberger y Dipolo - Dipolo con la finalidad de obtener una buena combinación de resolución lateral y vertical del subsuelo, esto es debido a las diferentes características resolutivas que cada arreglo posee. Ambos arreglos se llevaron a cabo con 48 electrodos equidistantes a 4 m esto con base en el largo de la línea seleccionada y la resolución deseada en el estudio (Figura 45).

## 5.4 Resultados



- Figura 45. Modelo preliminar de tomografía de resistividad eléctrica usando el arreglo Wenner Schlumberger.

En la figura 45 se muestra el resultado obtenido del arreglo Wenner Schlumberger. En este perfil se resaltan 2 estructuras altamente contrastantes siendo la primera de ellas una estructura bajo resistiva en la parte superior a una profundidad de aproximadamente 4 metros; resultado del riego diario de la cancha de futbol empastada.

La segunda estructura da inicio alrededor de los 18 metros de profundidad, se trata de una estructura alto resistiva, a la cual se le relaciona con una estructura basáltica y coincide con la correlación estratigráfica de los cortes litológicos realizada en la figura 30, tomando en cuenta que las variaciones litológicas presentadas en la zona no son demasiado abruptas.

## 6. Censo de aprovechamientos

### 6.1 Pozos

La obtención de información a partir de visitas directas a un pozo o manantial de interés se obtiene por medio del censo de un aprovechamiento. La información se requiere para fines estadísticos que posteriormente serán interpretados con el fin de obtener resultados que reflejen el comportamiento de un acuífero, así como una base de datos que será útil para estudios posteriores que permitan conocer el funcionamiento de éste.

La importancia de realizar un censo de pozos es principalmente conocer las características del aprovechamiento y del acuífero en estudio. Además, es posible tomar datos que ayuden a interpretar cuantitativamente la geología presente en la zona, el uso del recurso hídrico en cada aprovechamiento, su capacidad de abastecimiento y las limitaciones que se pueden presentar en la su extracción.

El equipo que se utilizó dentro del censo de aprovechamientos se enlista a continuación:

- GPS, GARMIN Etrex 10.
- Sonda eléctrica, contiene un circuito que cierra al contacto con el agua. La sonda tiene marcas cada 5 metros.
- Cámara fotográfica, con el fin de tener un registro digital de imágenes que avalen la visita.
- Cinta de aislar.

El procedimiento utilizado para el censo de pozos se describe a continuación:

1. Se obtuvo una base de datos con los pozos existentes por acuífero, las cuales proporcionan la ubicación aproximada del aprovechamiento.
2. Se accedió al lugar en vehículo.
3. En algunas ocasiones se entrevistó a los lugareños para conocer la localización exacta del pozo o manantial. Algunas de las personas que facilitaron el acceso al aprovechamiento coincidieron en ser los operadores del mismo.
4. Se adquirió la posición geográfica con receptor GPS.
5. Se recabaron los datos requeridos en el formato de censo de pozos previamente elaborado.

Toda la información obtenida en el censo de aprovechamientos se registró en la base de datos que se presenta en la tabla (Figura 46).

nombre del pozo	ubicacion	Condición	caudal (lps)	profundidad (m)	camara de bombeo (m)	cdt (carga dinamica total) (m)	Potencia de la bomba (hp)	nivel dinamico (m)	nivel estatico (m)	altura de brocal (cm)	abatimiento (m)	Tiempo de bombeo (hrs)
San Luis 5	14Q 0496998, 2129579	activo	16	50	-	-	-	-	37	-	-	18
San Luis 4	14Q 0496874, 2129604	inactivo	-	150, 400	-	-	-	-	37.16	-	-	-
San Luis 9	14Q0496327, 2129126	activo	58.5	-	-	-	100	50.8	-	50	-	24
s-11	14Q 0496334, 2128592	inactivo	10	-	82	120	-	-	-	-	-	-
nuevo San Luis	14Q 0495998, 2128593	activo	60	180	130	100	125	-	98.45	-	-	-
San Luis 10	14Q 0495952, 2129063	Activo	53.7	200	92	120	150	49.6	48.72	72	1.08	-
San Luis 7	14Q 0496484, 2129363	activo	-	110.5	-	-	-	-	46.96	-	-	-
San Luis 6	14Q 0497092, 2129631	Inactivo	-	-	-	-	-	-	37.2	-	-	-
San Luis 1	14Q0497484, 2129198	Inactivo	-	53	-	-	-	49.4	-	-	-	-
San Luis 2	14Q0497491, 2129185	inactivo y movido	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- Figura 46. Tabla que muestran las características de los pozos visitados en el pueblo de San Luis Tlaxialtemalco así como ubicaciones tomadas con receptor GPS.
- Observaciones: El pozo San Luis 4 presenta agua de mala calidad, el pozo San Luis 9 presenta agua de excelente calidad, el pozo Nuevo San Luis presenta agua de calidad media, el pozo san Luis 10 presenta agua de mala calidad y el pozo San Luis 6 presenta agua de mala calidad. (La calidad del agua se define con base en su olor fétido de los diferentes pozos muestreados).

## 6.2 Piezometría

La piezometría en los acuíferos se refiere a la medición de las fluctuaciones que se presentan en los niveles del agua subterránea, producidos por causas tanto naturales como artificiales.

Mediante pozos de monitoreo debidamente localizados y distribuidos en las áreas de estudio, es posible determinar las superficies piezométricas, efectuando lecturas periódicas de los niveles estáticos del agua subterránea, que son en sí los que interesan para el estudio del comportamiento de los acuíferos. Recibe el nombre de nivel estático, el nivel del agua subterránea que no se encuentra afectado por el bombeo en el pozo observado o en pozos cercanos a él. En el caso de acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide con el nivel freático mientras que en los acuíferos confinados la superficie queda representada por la altura que alcanza el nivel del agua y que pueden quedar por encima o debajo del suelo, dependiendo de la diferencia de presiones que haya entre un plano de referencia y los puntos observados.

La obtención de los datos piezométricos y su debida interpretación son el punto de partida para el estudio cuantitativo del agua subterránea por lo que al tomarlos se debe tener cuidado de que no estén afectados por factores que puedan invalidarlos.

Del procesamiento de datos piezométricos, pueden obtenerse diversas gráficas de las cuales las más útiles son, hidrógrafos de pozos, planos de profundidad elevación y evolución del nivel del agua y perfiles piezométricos.

## **6.3 Pruebas de bombeo**

### **6.3.1 Objetivos de la prueba**

Una prueba de bombeo tiene dos objetivos principales. El primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, más no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero. Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y aún regionales sobre el flujo del agua subterránea.

El segundo objetivo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado. Dicha definición deberá basarse además de los resultados de esta prueba de bombeo (aforo) en las características físico-químicas del agua extraída.

### **6.3.2 Metodología de ejecución**

La metodología para realizar una prueba de bombeo consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución del nivel del agua debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo y si es posible en pozos cercanos (pозos de observación).

A partir del comportamiento de los abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación y el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características del acuífero, como son: su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas, así como de recarga y definir y confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero (p.ej. semiconfinado).

El procedimiento para realizar un aforo es más sencillo, ya que no se requiere de pozos de observación únicamente se mide el caudal de descarga y el abatimiento del nivel del agua dentro del pozo.

Las pruebas de aforo suministran información sobre la calidad de construcción y desarrollo del pozo, pérdidas de carga a la entrada del agua al pozo, caudal de bombeo óptimo y profundidad a la que se debe colocar la bomba.

### **6.3.3 Elección del sitio de prueba**

Al planear la organización general de las pruebas de bombeo, el primer punto a definir es el sitio donde se hará ésta. En la mayoría de los casos el sitio ya está predeterminado y no hay posibilidades de cambiar a otro más adecuado, ya que casi siempre se tiene que utilizar pozos ya existentes o algunas veces se necesita conocer las características del acuífero en

un sitio en particular. Sin embargo, lo ideal es poder seleccionar el sitio más apropiado para la realización de la prueba.

Para la selección del sitio se deben considerar los siguientes puntos:

- Las condiciones hidrogeológicas del sitio no deben cambiar en distancias cortas y deben ser representativas de la zona de estudio.
- El conjunto motor-bomba debe ser capaz de trabajar continuamente a caudal constante, durante la duración de la prueba.
- El pozo de bombeo y los de observación deben ser fácilmente sondeables.
- El caudal de descarga en el pozo de bombeo debe ser medible directamente.
- El agua extraída no debe retornar al acuífero.
- El sitio donde se localiza el pozo debe ser de fácil acceso para el personal y el equipo.
- El pozo de bombeo debe ser totalmente penetrante (preferentemente).
- Los pozos de observación deben estar, en general, entre 10 y 100 m de separación del pozo de bombeo, en función del tipo de acuífero y duración de la prueba.
- Se deberá conocer el diseño final y materiales geológicos atravesados por los pozos de bombeo y observación.
- El gradiente hidráulico de la superficie piezométrica o freática, antes de iniciar la prueba, debe tender a cero al menos en el área de influencia de la prueba.
- Es conveniente que los pozos de bombeo y observación no se localicen en la vecindad de otros pozos en operación, en caso contrario, se debe conocer a detalle el régimen de operación de estos pozos.

#### **6.3.4 Características del pozo de bombeo**

Para elegir un pozo de abastecimiento de agua para la prueba de bombeo, éste debe presentar las características mencionadas anteriormente. Además, la prueba comenzará hasta que el nivel del agua en el mismo pozo se encuentre en reposo total.

Si no existen pozos de extracción en el sitio seleccionado para la prueba, se tendrá que construir uno para tal fin. Los pozos construidos para pruebas de bombeo no necesariamente requieren de un gran diámetro, estos pueden ser equipados con bombas de succión colocadas en la superficie del terreno. Es fundamental conocer el diseño constructivo y corte litológico de los pozos.

La bomba debe ser capaz de operar continuamente por 3 ó 4 días a una descarga constante. La capacidad de la bomba y la magnitud de la descarga, deberán ser lo suficientemente grandes para producir abatimientos medibles en el pozo de bombeo y piezómetros ubicados a distancias máximas de entre 100 y 200 m del pozo de extracción.

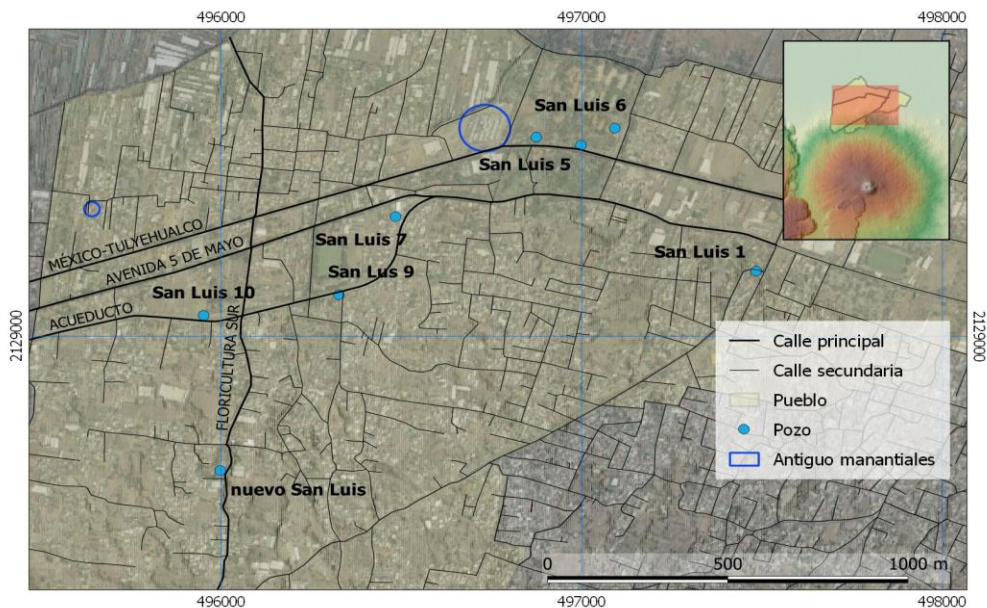
### 6.3.5 Realización de las pruebas

La parte más importante de una prueba de bombeo es medir el abatimiento (o recuperación, según de la etapa que se trate) de niveles de agua en los pozos de observación y en el de bombeo durante toda la prueba. Como el abatimiento y la recuperación de los niveles son mayores durante las primeras dos horas, las lecturas se deben realizar a intervalos cortos, estas se van aumentando conforme se prolonga el bombeo, se sugiere una secuencia de intervalos de tiempos, aplicables para el pozo de bombeo, así como para los de observación que se encuentren cercanos al pozo bombeado, ya que en ellos las variaciones de nivel del agua son inmediatas. Es recomendable que se realicen mediciones al mismo tiempo de conductividad eléctrica, pH y temperatura, así como que se colecten muestras de agua para su análisis posterior, a intervalos similares a las mediciones de niveles dinámicos; datos que permitirán definir la importancia de las componentes verticales de flujo.

Las pruebas de bombeo en los pozos San Luis Tlaxialtemalco 10 y 9 respectivamente cumplían con las características de condiciones hidrogeológicas que no cambiaran en distancias cortas y fueron representativas de la zona de estudio, también el conjunto motor-bomba de ambos pozos fue capaz de trabajar continuamente a caudal constante, durante la duración de la prueba, los pozos de bombeo fueron fácilmente sondeables, el caudal de descarga en los pozos de bombeo se pudo medir directamente, el agua extraída no retornaba al acuífero, se conoce el diseño final y materiales geológicos atravesados por los pozos de bombeo.

Ambos pozos bombeados se dejaron reposar 24 horas antes de la prueba.

Las pruebas de bombeo se realizaron en los pozos con la siguiente ubicación (Figura 47)



- Figura 47. Ubicación de antiguos manantiales, así como los pozos San Luis Tlaxialtemalco 10, 9 donde se realizaron las pruebas de bombeo. Modelo realizado en QGIS.

En las figuras 48 y 49 se muestran las fotografías de la realización de la prueba de bombeo en los pozos San Luis Tlaxialtemalco 10 y 9 respectivamente.



- Figura 48. Prueba de bombeo en pozo numero 10 San Luis Tlaxialtemalco (14Q045952, 2129063).



- Figura 49. Prueba de bombeo en pozo numero 9 San Luis Tlaxialtemalco (14Q0496327, 2129126).



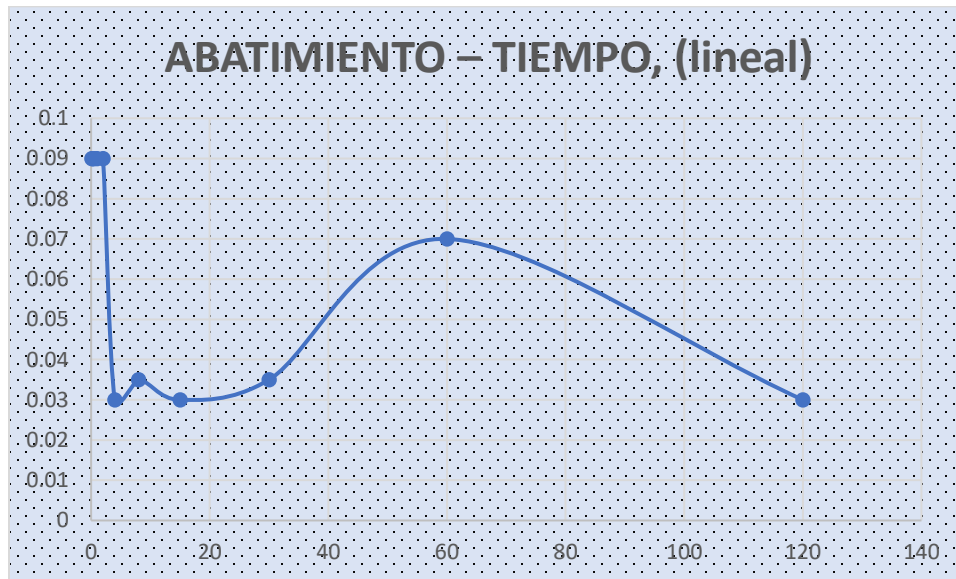
### 6.3.6 Interpretación de la prueba de bombeo en pozo San Luis Tlaxialtemalco 9

A continuación, se muestra la tabla con los datos de la prueba de bombeo en el pozo San Luis 9 (Figura 50).

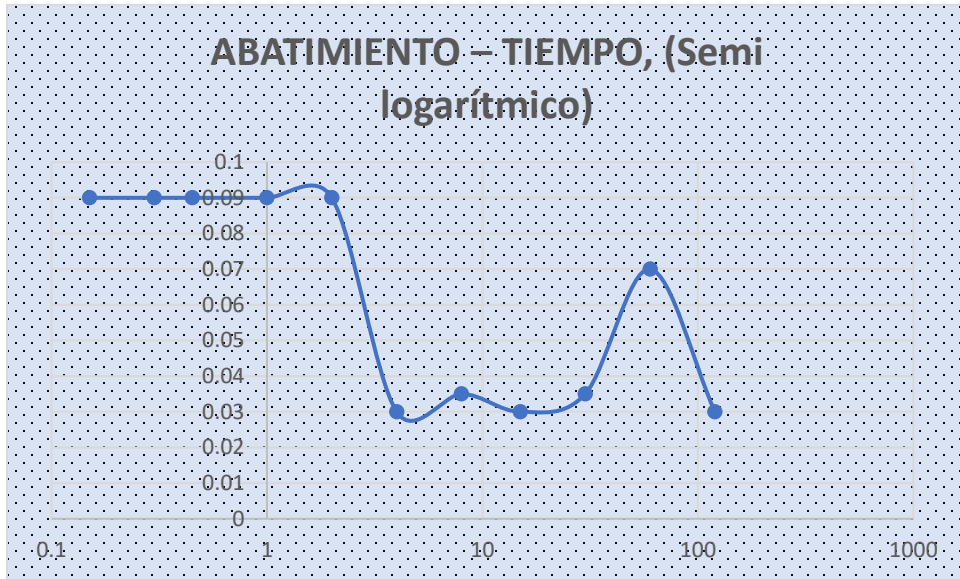
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Caudal ( lps)	Nivel Dinamico (m)	Caudal (lps)
0.15	0.09		50.93	58.6
0.3	0.09		50.93	
0.45	0.09		50.93	
1	0.09		50.93	
2	0.09	58.6	50.93	
4	0.03		50.87	
8	0.035		50.875	
15	0.03	58.4	50.87	
30	0.035	58.4	50.875	
60	0.07	58.6	50.91	
120	0.03	58.3	50.87	
la prueba de bombeo empezó a las 10 am				

- Figura 50. Tabla con los datos de la prueba de bombeo en el pozo San Luis 9

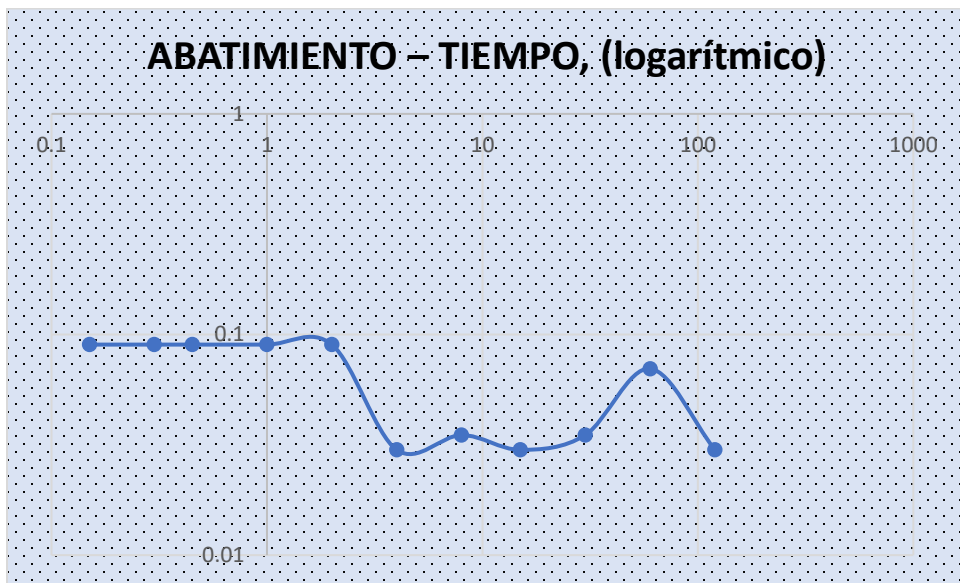
A continuación, se presentan las gráficas resultado de la prueba de bombeo en escala lineal, semi logarítmica y logarítmica Figuras (51, 52 y 53).



- Figura 51. ABATIMIENTO – TIEMPO, (lineal).



- Figura 52. ABATIMIENTO – TIEMPO, (Semi logarítmico).



- Figura 53. ABATIMIENTO – TIEMPO, (Semi logarítmico).

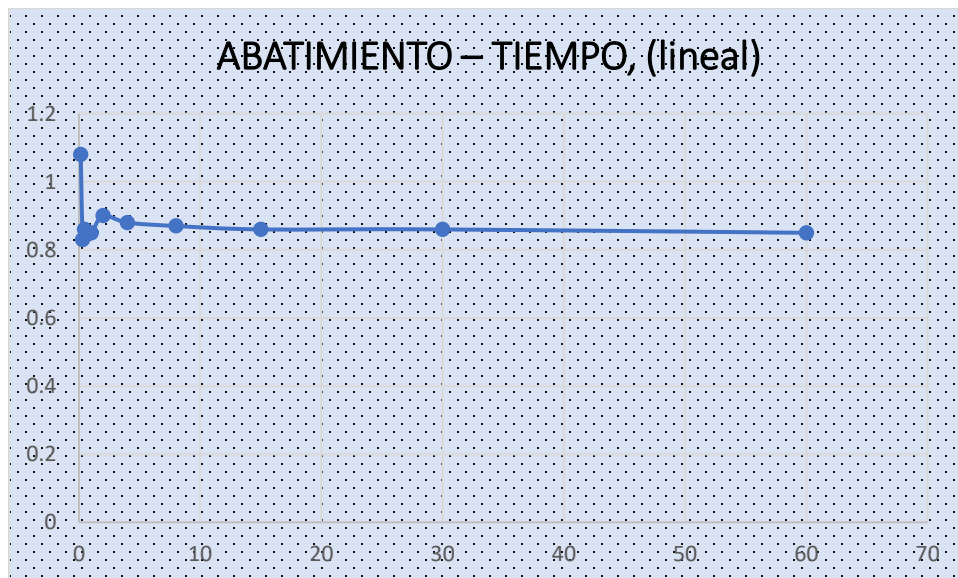
### 6.3.7 Interpretación de la prueba de bombeo en pozo San Luis Tlaxialtemalco 10

A continuación, se muestra la tabla con los datos de la prueba de bombeo en el pozo San Luis 10 (Figura 54).

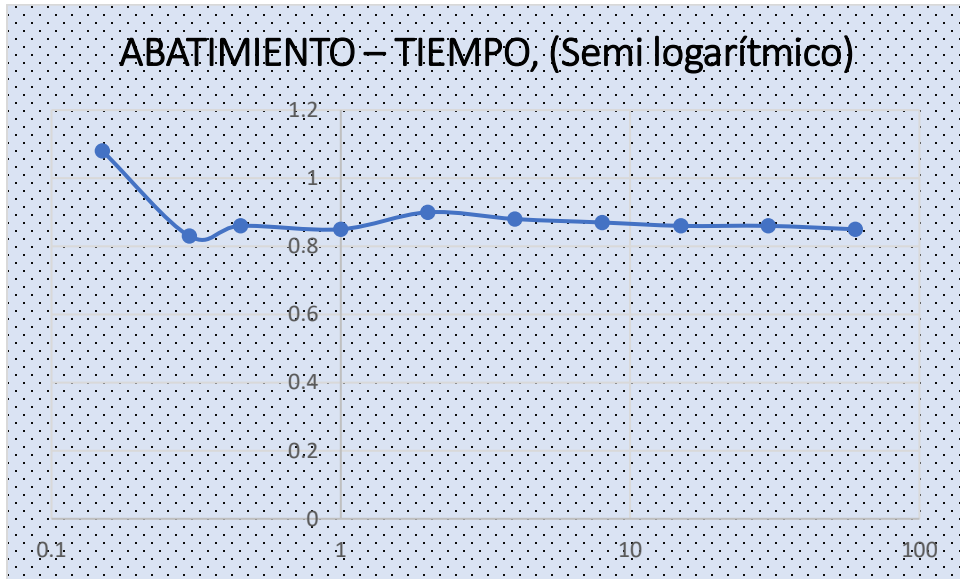
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	caudal ( lps)	Nivel Dinamico (m)	Caudal
0.15	1.08		49.8	52.1
0.3	0.83		49.55	
0.45	0.86		49.58	
1	0.85		49.57	
2	0.9	52.1	49.62	
4	0.88		49.6	
8	0.87		49.59	
15	0.86	52.8	49.58	
30	0.86	53.9	49.58	
60	0.85	53.4	49.58	
la prueba de bombeo empezó a las 10 am				

- Figura 54. Tabla con los datos de la prueba de bombeo en el pozo San Luis 9

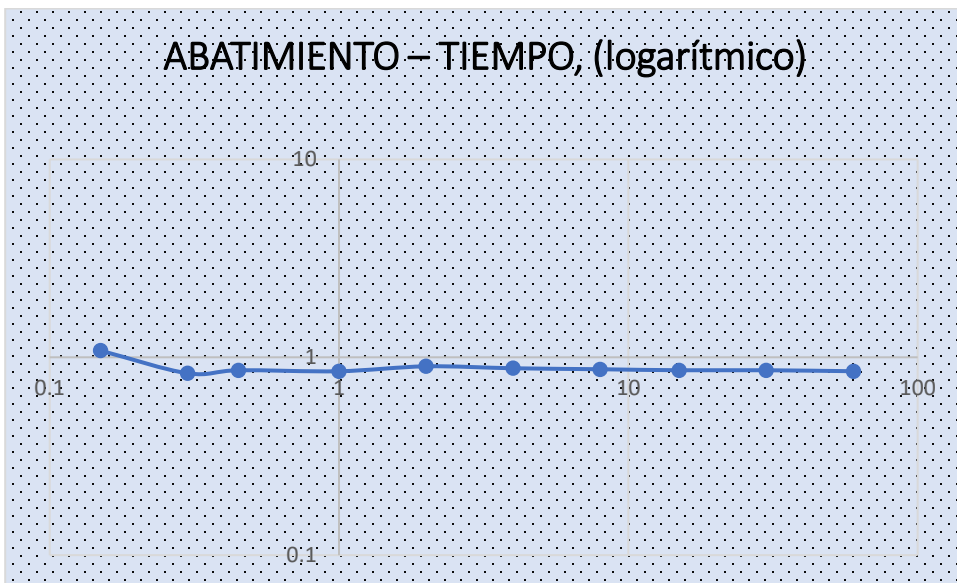
A continuación, se presentan las gráficas resultado de la prueba de bombeo en escala lineal, semi logarítmica y logarítmica Figuras (55, 56 y 57).



- Figura 55. ABATIMIENTO – TIEMPO, (lineal).



- Figura 56. ABATIMIENTO – TIEMPO, (semi logarítmico).



- Figura 57. ABATIMIENTO – TIEMPO, (logarítmico).

La conclusión es que al ver las graficas se observa que el acuífero en estudio no presenta niveles de estrés, es decir la bomba no es capaz de generar un cono de abatimiento por lo no es posible determinar el tipo de acuífero mediante métodos convencionales , puesto que con el paso del tiempo el nivel no varía considerablemente, esto indica que el valor de transmisividad en esa zona es muy alto, y solo se están haciendo pruebas a la bomba, en este caso se necesitaría una bomba más potente que logre generar un cono de abatimiento y así hacer la prueba de bombeo y conocer las características hidráulicas del acuífero.

### **6.3.8 Configuración del nivel estático**

El conocimiento de la distribución de elevaciones del nivel en un acuífero, aporta la información necesaria para la determinación de las direcciones preferenciales de movimiento del agua subterránea y, por lo tanto, de su red de flujo. La medición de niveles se efectúa periódicamente en aquellos aprovechamientos que reúnen características favorables para la observación continua y sistemática de la posición de los niveles estáticos del agua. Una vez seleccionados los aprovechamientos en los que se realizan las mediciones del nivel (estático, o cuando esto no sea posible, por estar operando en el equipo de bombeo, el dinámico), se procede a efectuar la nivelación de brocales de los pozos, a fin de referirlos a un banco de nivel topográfico común (el que a su vez se refiere al nivel medio del mar).

Conocida la profundidad al nivel estático de los pozos seleccionados para efectuar las mediciones, se hace uso de esta información para el trazo de un plano de curvas de igual profundidad. Este plano junto con el topográfico, define las probables zonas de descarga por evapotranspiración. Los datos recabados de la nivelación de brocales y de las mediciones de la profundidad al nivel estático, para las fechas de cada recorrido hacen posible determinar las elevaciones del nivel estático en la zona las que pueden ser configuradas en un plano para mostrar la distribución de las equipotenciales del flujo subterráneo.

Las mediciones piezométricas obtenidas en dos recorridos de medición, pueden ser aprovechadas para la formación de planos de curvas de igual evolución del nivel estático, para el intervalo de tiempo que separa a ambas observaciones. Las curvas de igual evolución, cuando el lapso de tiempo es el adecuado, muestran la ubicación de las zonas en donde es conveniente la reducción o incremento del bombeo.

La configuración de las elevaciones del nivel estático, de una fecha determinada, junto con las líneas ortogonales a estas definen la red de flujo en la formación.

### 6.3.9 configuración del nivel estático en el área de estudio

A continuación, se presenta la información de los pozos con los que se realizó la configuración de los planos de profundidad al nivel estático (Figura 58) y el área de los diferentes pozos, se presentan en las figuras 59, 60, 61 y 62 también un plano de elevación del nivel estático y dirección de flujo (Figura 63).

#### -Pozo nuevo San Luis

- Profundidad de perforación: 180 m
- Nivel estático: 98.45 m
- Cota de elevación: 2304 msnm

#### -Pozo San Luis 10

- Profundidad de perforación: 200 m
- Nivel estático: 48.72 m
- Cota de elevación: 2252 msnm

#### Pozo San Luis 9

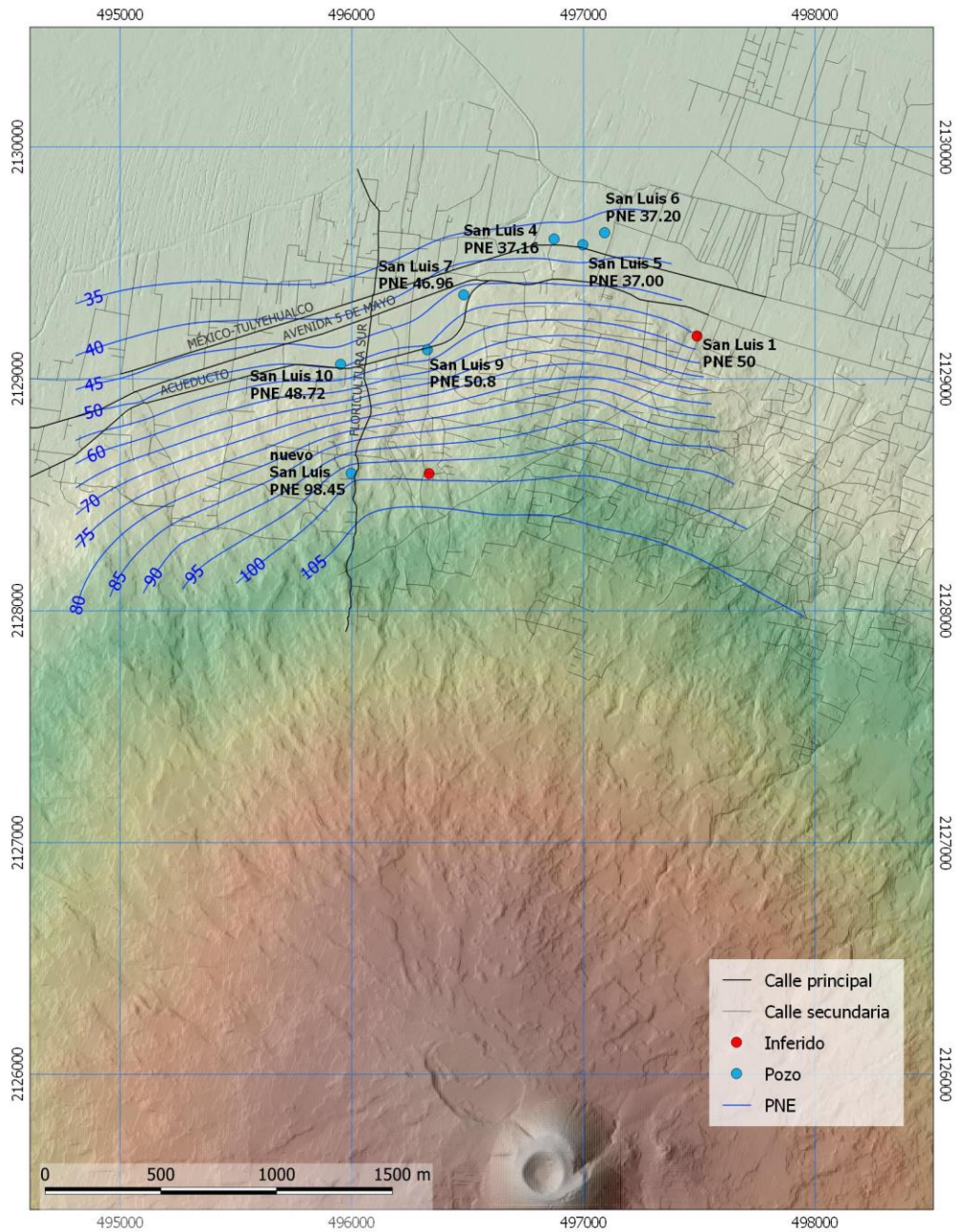
- Profundidad de perforación: 120 m
- Nivel estático: 50.8 m
- Cota de elevación: 2254 msnm

#### -Pozo San Luis 7

- Profundidad de perforación: 110.55 m
- Nivel estático: 46.96 m
- Cota de elevación: 2253 msnm

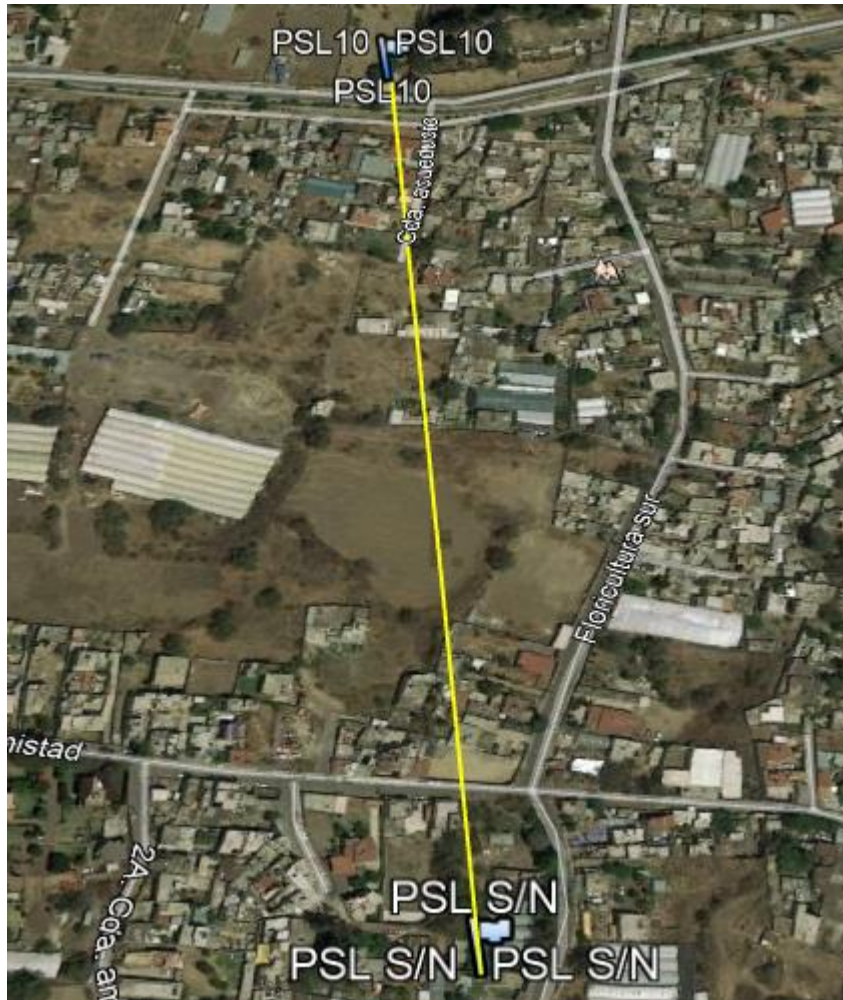
#### -Pozo San Luis 5

- Profundidad de perforación: 50 m
- Nivel estático: 37 m
- Cota de elevación: 2254 msnm



- Figura 58. Plano de profundidad al nivel estático. Modelo realizado en QGis. (En el plano se muestra la profundidad de nivel estático, podemos observar que en la zona cerril encontramos los niveles estáticos más profundos y en la zona chinampera los niveles estáticos más someros).

## Configuración de elevación de nivel estático 1



- Figura 59. Configuración de la elevación del nivel estático en pozo nuevo San Luis a pozo San Luis 10. Imagen tomada de Google Earth.

Configuración de la elevación del nivel estático (C.E.N.E.).

Pozo Nuevo San Luis Q=60 lps.  
lps.

Pozo San Luis 10 Q=53.7

C.E.N.E.= 2304 m – 98.45 m = 2205 m.  
2203.28 m.

C.E.N.E. = 2252 m – 48.72 m =

$$i_{HII} = (2205.55 \text{ m} - 2203.28 \text{ m}) / (467.61 \text{ m}) = 0.0048544.$$

Al ser positivo el gradiente hidráulico, el flujo del agua va del pozo Nuevo San Luis al pozo san Luis 10.



## Configuración de elevación de nivel estático 2



- Figura 60. Configuración de la elevación del nivel estático en pozo San Luis 10 a pozo San Luis 9. Imagen tomada de Google Earth.

Configuración de la elevación del nivel estático (C.E.N.E.).

Pozo San Luis 10  $Q=53.7$  lps.

C.E.N.E. =  $2252 \text{ m} - 48.72 \text{ m} = 2203.28 \text{ m}$ .  
 $2203.2 \text{ m}$ .

Pozo san Luis 9  $Q=58.5$  lps.

C.E.N.E.=  $2254 \text{ m} - 50.8 \text{ m} =$

$$i_{I-II} = (2203.28 \text{ m} - 2203.2 \text{ m}) / (380.46 \text{ m}) = 0.0002102.$$

Al ser positivo el gradiente hidráulico, el flujo del agua va del pozo San Luis 10 al pozo san Luis 9.

### Configuración de elevación de nivel estático 3



- Figura 61. Configuración de la elevación del nivel estático en pozo San Luis 9 a pozo San Luis 7. Imagen tomada de Google Earth.

Configuración de la elevación del nivel estático (C.E.N.E.).

Pozo San Luis 9  $Q=58.5$  lps.

C.E.N.E.=  $2254 \text{ m} - 50.8 \text{ m} = 2203.2 \text{ m}$ .  
 $2206.04 \text{ m}$ .

Pozo San Luis 7  $Q=???$

C.E.N.E.=  $2253 \text{ m} - 46.96 \text{ m} =$

$$i_{HII} = (2203.2 \text{ m} - 2206.04 \text{ m}) / (292.51 \text{ m}) = -0.0095723.$$

Al ser negativo el gradiente hidráulico, el flujo del agua va del pozo San Luis 7 al pozo San Luis 9.

#### Configuración de elevación de nivel estático 4



- Figura 62. Configuración de la elevación del nivel estático en pozo San Luis 7 a pozo San Luis 5. Imagen tomada de Google Earth.

Configuración de la elevación del nivel estático (C.E.N.E.).

Pozo San Luis 7  $Q=???$

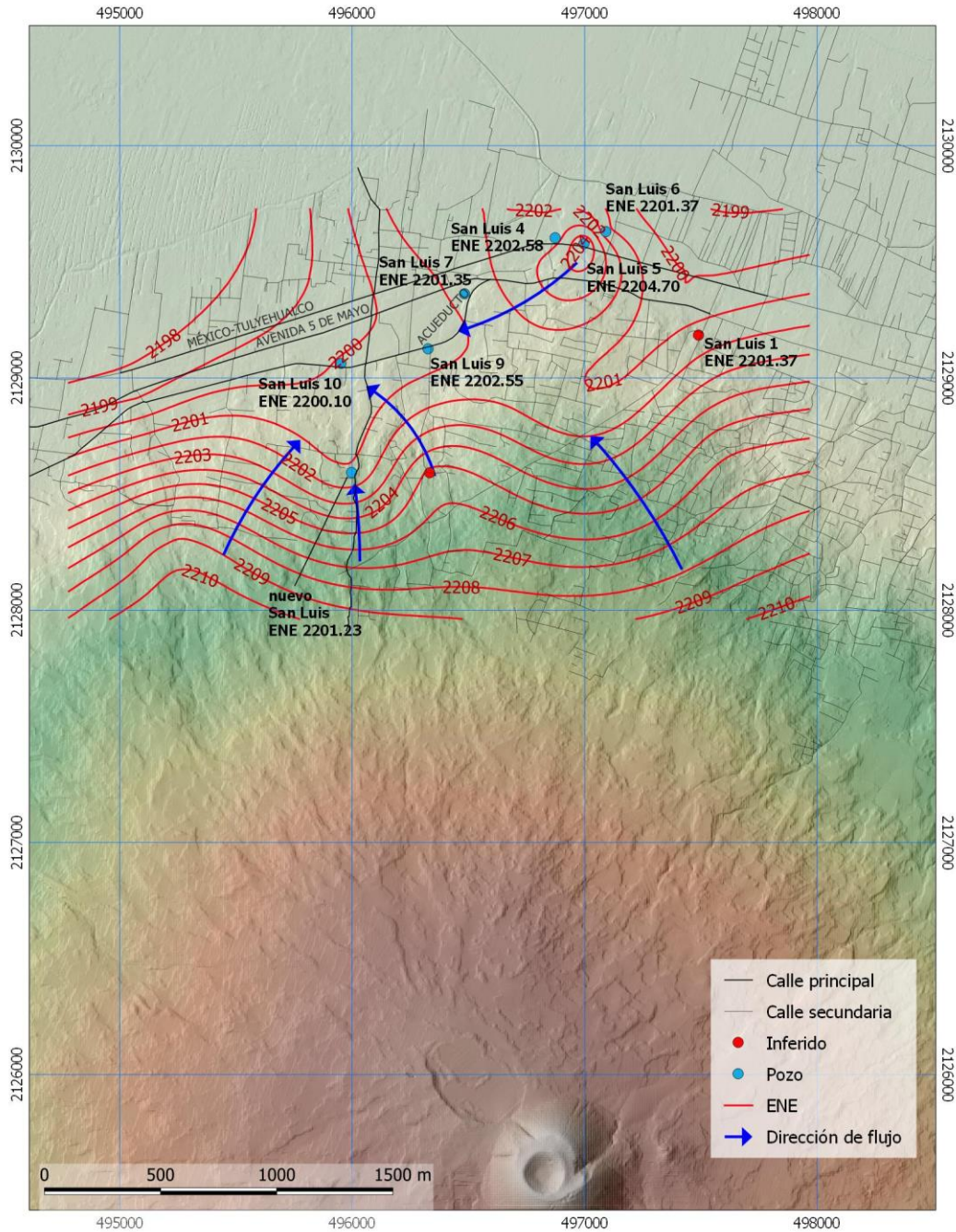
C.E.N.E.= 2253 m – 46.96 m = 2206.04 m.  
m.

Pozo San Luis 5  $Q=16$  lps.

C.E.N.E.= 2254 m – 37 m = 2217 m.

$$i_{I-II} = (2206.04 \text{ m} - 2217 \text{ m}) / (558.94 \text{ m}) = -0.0196085.$$

Al ser negativo el gradiente hidráulico, el flujo del agua va del pozo San Luis 5 al pozo San Luis 7.



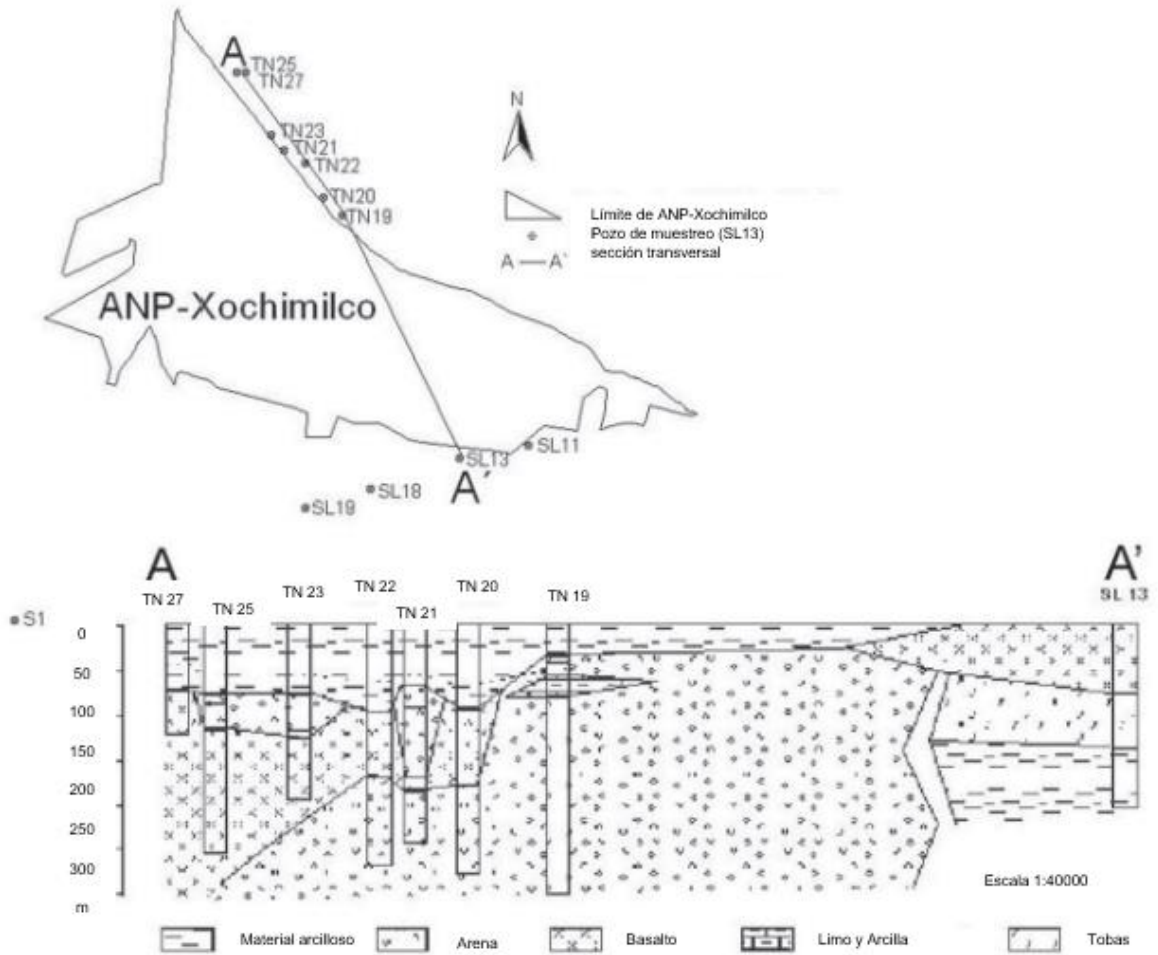
- Figura 63. Plano de elevación de nivel estático y direcciones de flujo. Modelo realizado en QGis. (El flujo se dirige hacia los pozos 10 y 9 respectivamente ya que son los pozos que tiene el mayor caudal y en el pozo 9 es donde se forma el cono de abatimiento).

## **6.4 Hidrogeología**

### **6.4.1 Funcionamiento hidrogeológico**

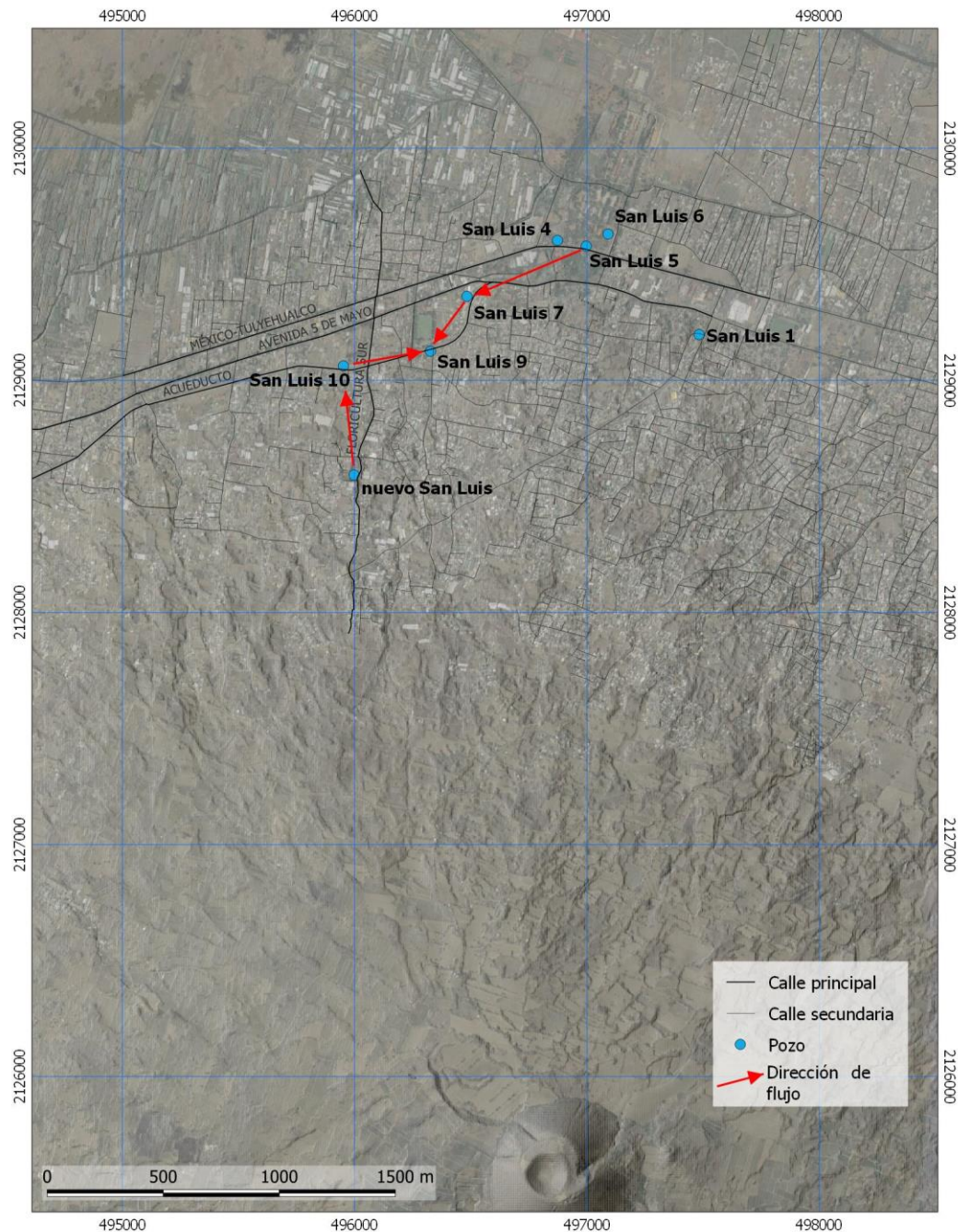
En la Ciudad de México, la extracción del agua subterránea por medio de pozos se inició en 1847, a partir de esa fecha el crecimiento de pozos fue vertiginoso, para 1864 existían ya 200 pozos de carácter artesiano, 483 para 1877 y 1,100 en 1888. A principios de siglo XX, con lo asequible de la bomba eléctrica se intensificó la extracción por pozos cada vez más profundos, así, entre 1936 y 1944 se perforaron 93 pozos a mayor profundidad. Estas obras se sumaron al proyecto de captación de los manantiales de Xochimilco llevado a cabo en 1913, sin embargo, no resultaron suficientes para resolver los problemas de abasto de la ciudad, por lo que en 1942 se propone la captación y conducción de agua de los manantiales de Lerma a la Ciudad de México. A pesar de la creciente dependencia que se ha tenido de fuentes de agua subterránea, en el ámbito de los tomadores de decisión, su interés por estudiar el agua subterránea y conocer su funcionamiento ha sido limitado comparado con la importancia que tiene en el desarrollo del país. Aunado a su importancia socioeconómica, el agua subterránea mantiene funciones de ecosistema claves, pero poco conocidas.

Como alternativa a la visión fragmentada de la condición del recurso y de los impactos ambientales causados por una extracción ineficiente, se aplica un enfoque metodológico, que incorpora una visión dinámica y holística del flujo subterráneo a través de una serie de indicadores directos e indirectos que se desprenden del “análisis de los sistemas de flujo”. Estos indicadores permiten definir al agua en términos de cantidad y calidad, y explicar su funcionamiento a partir de esclarecer procesos y respuestas ambientales que son resultado de un manejo específico. Dentro de los indicadores se tienen elementos de tipo hidrológico, hidrogeoquímico, geológico, topográfico, edafológico, y de vegetación (figura 64).



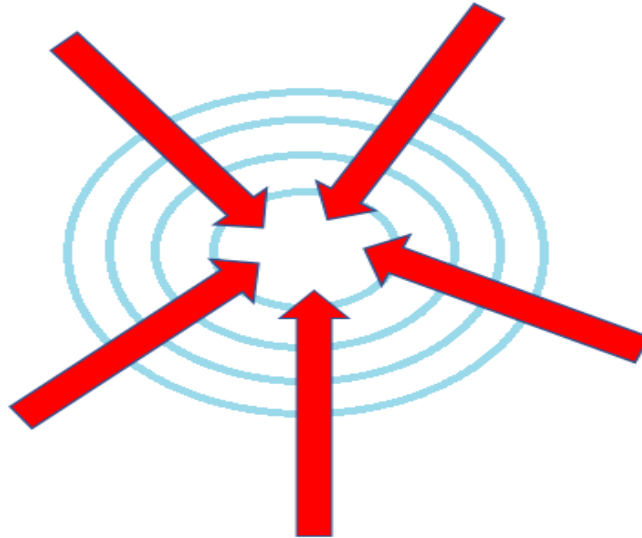
- Figura 64. El análisis de los sistemas de flujo permite jerarquizar el movimiento del agua subterránea y establecer el funcionamiento del ANP-X en relación con el resto de la Cuenca de México y cuencas adyacentes y permite definir indirectamente las condiciones del agua subterránea en partes altas de la cuenca, donde la información es insuficiente.

Al analizar los resultados de la configuración de la elevación del nivel estático en el pueblo de San Luis Tlaxialtemalco se obtiene que el flujo de agua subterránea se dirige hacia el pozo San Luis Tlaxialtemalco 9, tal y como se observa en la figura 65.



- Figura 65. En la siguiente imagen se resume gráficamente las direcciones de flujo obtenidas de las configuraciones de elevación del nivel estático. Modelo Realizado en QGIS.

El gradiente hidráulico se dirige al pozo San Luis 9, la posible razón es que dicho pozo bombea un caudal de 58.5 lps (excluyendo al Pozo Nuevo San Luis que es la zona de recarga) tiene el mayor caudal y se infiere que está ocurriendo un gran cono de abatimiento, generado por el cono de abatimiento (Figura 66).



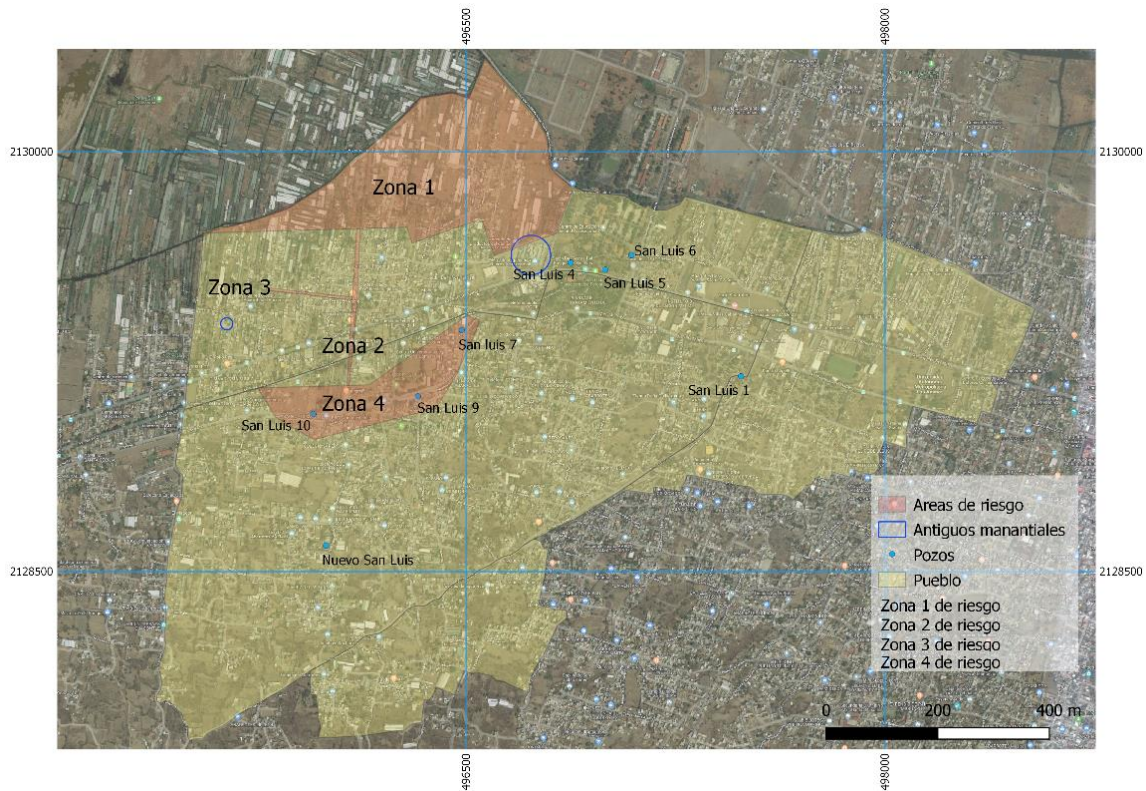
- Figura 66. Debido al sobrebombeo del pozo San Luis 9 con respecto a los demás pozos, el agua fluye hacia el mismo, a este fenómeno se le conoce como parteaguas hidrodinámico.



## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- De acuerdo con los resultados de la investigación se comprobaron 3 zonas en donde:
  - Zona I (cerril) El resultado de los caminamientos arrojó que el subsuelo se compone de bloques de roca basáltica y material no compactado de tipo arena producto de la erosión del basalto Abarca desde la parte alta del volcán Teuhtli teniendo como limite transicional a partir del acueducto hacia el norte.
  - Zona II (centro) Con ayuda de la correlación estratigráfica se encontró que el subsuelo se compone estratigráficamente de las siguientes litologías: roca basáltica, ceniza volcánica, tezontle con lapilli, grava con arena y arcilla, Abarca de forma transicional del acueducto hacia el norte con el límite de la zona de chinampas de forma transicional hacia la zona III.
  - Zona III (lacustre) Con ayuda de la correlación estratigráfica se encontró que el subsuelo contiene una capa predominante de arcilla, Abarca toda la zona chinampera.
- De manera general el flujo de agua subterránea va de las partes más altas hacia la zona de chinampas, sin embargo, en el pozo 9 ocurre un fenómeno llamado cono de abatimiento el cual a las cercanías del pozo el agua fluye de manera radial hacia el mismo.
- Con ayuda de las entrevistas se pudo inferir la antigua morfología del pueblo y comprender así la evolución que ha tenido a lo largo de su historia.
- Con la información recabada en los caminamientos realizados en el pueblo se hizo una base de datos con la orientación de las fracturas posteriores al sismo del 19 de septiembre de 2017 y esos datos fueron procesados dando como resultado la orientación preferencial de fractura NW-SE.
- Debido a la composición arcillosa del suelo en la zona chinampera, tiene poca capacidad de carga recomendando una losa cimentación esto para el caso de una casa de dos niveles.
- En la figura 67 se muestra el mapa geológico de riesgos.



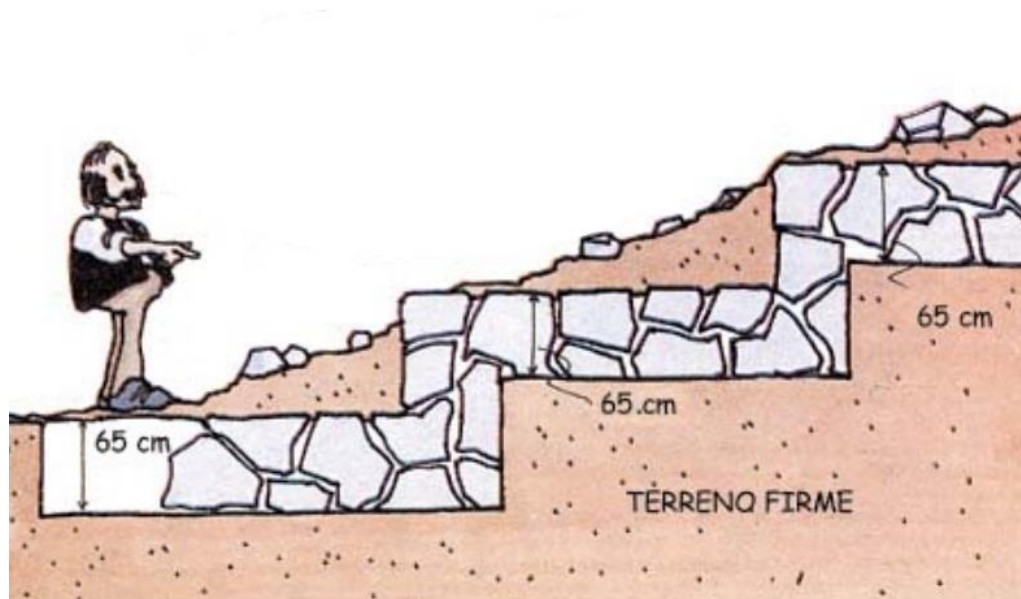
- Figura 67. Mapa geológico de riesgos. Modelo generado en QGIS.

Se definen 4 zonas de riesgos las cuales se explican a continuación:

- Zona 1: El área comprende la zona de chinampas en donde por la composición del suelo arcilloso se recomienda no construir predios mayores a dos plantas.
- Zona 2: El área comprende específicamente la calle de Floricultor la cual se sabe que era una antigua barranca, por la inclinación de la calle y por ser calle principal para el acceso al pueblo en temporada de lluvia se convierte en un peligro debido a que escurre grandes cantidades de agua, la cual afectaría a casas colindantes con inundaciones y también podría generar socavones que afecten la integridad estructural de las construcciones.
- Zona 3: El área comprende principalmente la calle de Camelia por la cual atraviesa un ducto de drenaje y debido a una mala compactación del terreno al momento de su construcción presenta hundimientos diferenciales, los cuales afectan las casas colindantes provocando inclinación en las construcciones.
- Zona 4: El área comprende lugares cercanos a los pozos San Luis 10, 9, 7 respectivamente, las construcciones cercanas a los pozos están en riesgo debido a que los pozos mencionados son los que extraen mayor caudal y con ello se aumenta la probabilidad de hundimiento diferencial en la zona.

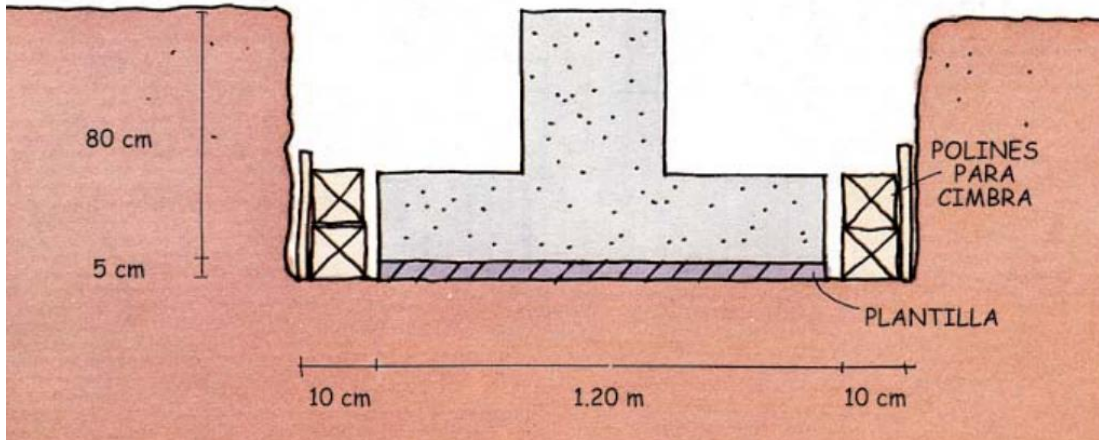
## Recomendaciones

- Realizar estudio para definir la capacidad de carga del terreno y con base en los resultados obtenidos nos dirá el tipo de cimentación y la altura que pueden tener las edificaciones.
- Mejorar el terreno arcilloso con tepetate compactado para aminorar el riesgo de subsidencia en las construcciones.
- Construir alcantarillados en la zona cerril para evitar la contaminación del acuífero.
- Evitar fugas de drenaje de la zona centro, utilizar tuberías flexibles para evitar fracturas en el entubado, así como un correcto aplanado del terreno para evitar el hundimiento diferencial.
- Poner testigos para medir la subsidencia del terreno por lo menos una vez al año.
- Darles mantenimiento a los pozos existentes para distribuir el bombeo.
- Para construir en un terreno en desnivel si es muy grande la inclinación debe hacerse una excavación y cimentación en forma escalonada que deberá tener 65 cm de altura como se muestra en la figura 68.



- Figura 68. Excavación y cimentación en forma escalonada. Imagen tomada del manual de autoconstrucción y mejoramiento de la vivienda.

- Si el terreno es plano y blando, se construye una zapata de concreto armado, este cimiento tiene 1.20m de base y 80cm de altura como se muestra en la figura 69. nota: La profundidad y ancho de la zanja dependen de la calidad del suelo que puede ser blando o duro, por lo tanto, el cimiento es diferente para cada tipo de suelo.



- Figura 69. Zapata de concreto armado. Imagen tomada del manual de autoconstrucción y mejoramiento de la vivienda.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- ANGELES SERRANO GABRIELA, PEREVOCHTCHIKOVA MARIA, CARRILLO RIVERA J. JOEL. (2008). Posibles Controles Hidrogeológicos de Impacto Ambiental por la Extracción de Agua Subterránea en Xochimilco, México. En Journal of Latin American Geography (pp. 39-56). University of Texas.
- BARRERA MENDOZA JOSÉ ANTONIO. (2015). --. En EMPLEO DEL MÉTODO GEOFÍSICO TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PARA LA UBICACIÓN DE UN SITIO DE RECARGA DE ACUÍFERO EN XOCHIMILCO (pp. 8-53).
- CEMEX EN APOYO CON LA UNAM. (--). MANUAL DE AUTOCONSTRUCCIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA VIVIENDA. 2019, de CEMEX y la Facultad de Ingeniería de la UNAM Sitio web: [http://www.enmarcha.unam.mx/manual\\_autoconstruccion.pdf](http://www.enmarcha.unam.mx/manual_autoconstruccion.pdf).
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. (1994). --. En MANUAL PARA EVALUAR LOS RECURSOS HIDRÁULICOS SUBTERRÁNEOS. (--). México, D.F.
- CRUZ ATIENZA VÍCTOR M, KRISHNA SHRI, I. de Geofísica, Ordaz Mario. (2017). ¿QUÉ OCURRIÓ EL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 EN MÉXICO? 2018, de I. de Ingeniería, UNAM Sitio web: <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico->
- ENRIQUETA GARCÍA. (1998). Clasificación de Köppen, modificado por García.
- GARCÍA ENRIQUETA. (1998). MODIFICACIONES AL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN. México: UNAM.
- GERMÁN SÁNCHEZ MARIANA AURORA. (2011). BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO VALLE DE HUIMILPAN, ESTADO DE QUERÉTARO. México: UNAM.
- GIL FRAUSTO KAREN MICHEL. (2015). IDENTIFICACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL PELIGRO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA QUE AFECTAN LOS POBLADOS DE LA DELEGACIÓN XOCHIMILCO. México: UNAM.
- GUTIÉRREZ MOLINA JORGE. (2004). TRADICIÓN Y MODERNIDAD EN XOCHIMILCO.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. (1996). Cuaderno Estadístico Delegacional de Xochimilco. 2018, de INEGI Sitio web: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825926892/702825926892\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825926892/702825926892_1.pdf).
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. (1989). XOCHIMILCO CUADERNO DE INFORMACIÓN BÁSICA DELEGACIONAL. 2018, de INEGI Sitio web: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825920876/702825920876.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1334/702825920876/702825920876.pdf).

- Programa General para el Desarrollo del Distrito Federal. (1995-2000)., PROGRAMA DELEGACIONAL DE DESARROLLO URBANO DE XOCHIMILCO. 2018, de Gobierno del Distrito Federal Sitio web: [http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/programas/PDDU\\_Gacetas/2015/PDDU\\_XOCHIMILCO\\_GODF\\_6-MAY-05.pdf](http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/programas/PDDU_Gacetas/2015/PDDU_XOCHIMILCO_GODF_6-MAY-05.pdf)
- SEMARNAT. (2016). ACUERDO POR EL QUE SE DA A CONOCER EL RESULTADO DE LOS ESTUDIOS TÉCNICOS DE LAS AGUAS NACIONALES SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO.
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2017, ESTRATIGRAFÍA.
- TOMAS JOVER R., FERREIRO PRIETO I, SANTANA GADEA I, DIAZ IVORRA C. (2002). APLICACIONES DE LA PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA EN INGENIERÍA GEOLÓGICA. 2018, de INEGRAF Sitio web: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/21681/1/29.pdf>.