



Informe realizado por GEOTEM y la brigada conjunta estudiantil UNAM-IPN como apoyo técnico debido a la contingencia producto del sismo del 19/09/2017. Evaluación del Riesgo en la zona de San Gregorio, Del. Xochimilco.

Trabajo por:



**GEOTEM**  
Ingeniería S.A. de C.V.

Emisión:

**OCTUBRE, 2017**

**GEOTEM Ingeniería, S.A. de C.V.**

Alhelí Mz. 7 Lt. 13A. Col. Ejidos San Pedro Mártir Tlalpan, México,  
Teléfono: 52+55 54 85 60 32 Fax: 52+55 54 85 14 37 ext. 104



## Tabla de Contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 LOCALIZACIÓN REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
<b>2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN PREVIA</b>	<b>9</b>
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL	10
2.2 MAGNETOMETRÍA AÉREA REGIONAL	13
2.2.1 MAPA MAGNÉTICO CAMPO TOTAL	13
2.2.2. MAPA MAGNÉTICO DE REDUCCIÓN AL POLO	15
2.2.3. MAPA MAGNÉTICO SEÑAL ANALÍTICA	15
2.2.4. MAPA MAGNÉTICO DERIVADA TILT	16
2.3 RESULTADOS DE GRAVIMETRÍA EN LA ZONA	20
2.3.1 MAPA REGIONAL ANOMALÍA DE BOUGUER	20
2.3.2 MAPA REGIONAL RESIDUAL DE ANOMALÍA DE BOUGUER	22
<b>3. ACTIVIDADES DE CAMPO Y RESULTADOS</b>	<b>24</b>
3.1 PLANEACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE CAMPO	24
3.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE SAN GREGORIO, XOCHIMILCO.	25
3.3 EXPLORACIÓN POR GEORADAR	28
3.3.1 ZONA ANÓMALA	30
3.4 APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA CON DRONE	42
<b>COLABORADORES ESTUDIANTILES:</b>	<b>44</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>45</b>
4.1 CONCLUSIONES	45
4.2 RECOMENDACIONES	48
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>50</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b>	<b>51</b>

## RESUMEN

---

Como parte de las actividades de apoyo técnico para la evaluación de riesgo y daño en la zona de San Gregorio, ocasionado por el sismo ocurrido el martes 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, se integró una brigada de voluntarios con el objetivo de determinar una serie de parámetros geofísicos y geológicos. Estos datos permiten deducir la continuidad de las estructuras geológicas en el subsuelo y servirán para planificar estratégicamente el futuro desarrollo urbano, dada la modificación del uso de suelo reciente (de agrario a urbano, y en crecimiento progresivo).

GEOTEM Ingeniería, como parte del compromiso social que tiene con la sociedad a causa de este evento, y un grupo de comprometidos estudiantes voluntarios de la UNAM y del IPN, participaron entusiastamente en una serie de actividades enfocadas en la evaluación de riesgo de la zona.

Como antecedentes necesarios previos a la elaboración de este informe, se requirió de datos aereomagnéticos disponibles de la zona. Esta información fue adquirida del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y a partir de ellos se elaboraron mapas que permitieron inferir y verificar la presencia de varios sistemas de fallas que afectan a la región y que pueden estar relacionadas con los patrones de subsidencia documentados en el presente trabajo. Es de especial aplicación el mapa geofísico procesado de señal analítica dado que permite delimitar las litologías asociadas a eventos volcánicos preexistentes respecto a unidades sedimentarias más recientes, además de que adicionalmente ayuda a delinear o inferir la traza de fallamiento tectónico (trazas de estructuras indicadas con línea punteada).

El levantamiento estructural del sitio permitió identificar una serie de sistemas de fracturamiento, fallamiento y subsidencia y se verificó el efecto del sismo en infraestructura urbana de la zona norte del Poblado de San Gregorio. El conjunto de estos efectos queda

evidenciado particularmente en la zona noroeste del Barrio de San Gregorio, donde se identificó la ruptura y agrietamiento de tuberías de conducción (con orientación N-S) y que se utiliza para abastecimiento de aguas de riego.

El objetivo principal fue el de realizar un análisis geológico-geofísico de la zona. La participación del grupo se focalizó en:

- a. Un levantamiento estructural lo más detallado posible (dadas las condiciones del sitio, horas después del evento telúrico)
- b. La aplicación del método de georadar de penetración terrestre
- c. Obtención de imágenes aéreas de baja altura por medio de cámara termográfica acoplada a un Drone.

Estas actividades fueron solicitadas por el grupo de Protección Civil (PC) de la Delegación Xochimilco, quien apoyo en logística inicial. Los esfuerzos se enfocaron en el núcleo urbano-agrario del Barrio de San Gregorio, de la misma delegación.

## 1. INTRODUCCIÓN

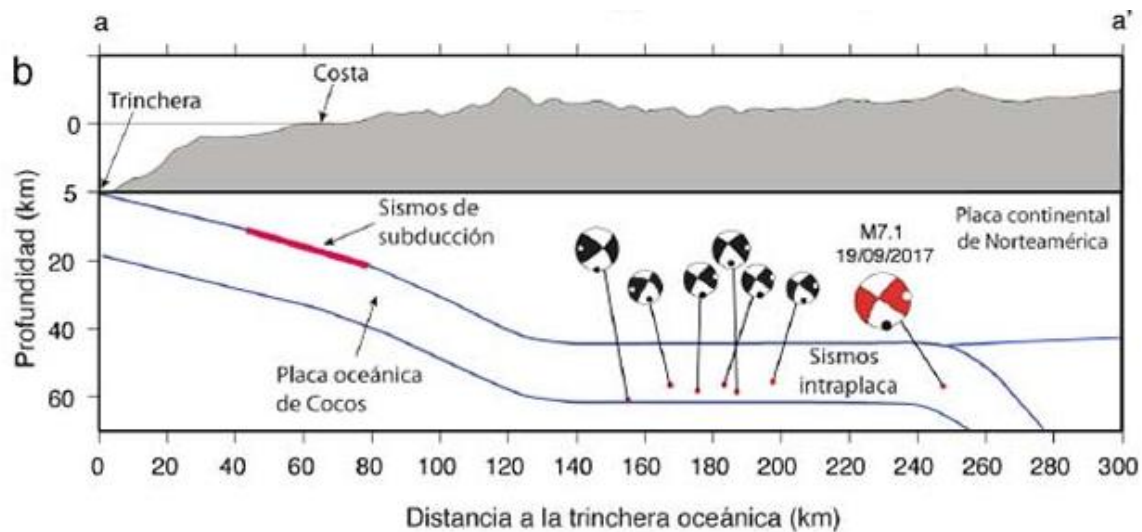
Debido a la compleja interacción de 5 placas tectónicas, México se encuentra en una zona geológica de alta sismicidad (Figura #1.1), por lo que no es raro, sino más bien frecuente la ocurrencia de sismos de distinta intensidad, principalmente en la margen occidental del territorio. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) reporta la ocurrencia en promedio de 40 sismos por día. Muchos de estos fenómenos telúricos ocurren en la margen del Pacífico Mexicano (i.e.: sismo del 1909/1985), siendo menos frecuente la ocurrencia de eventos telúricos en la región limítrofe de los estados de Puebla y Morelos. El terremoto más reciente (24 de octubre de 1980) en esta zona del centro de México fue de magnitud considerable (7.1) y se localizó a 19 km al oeste de Acatlán de Osorio, Puebla.



*Figura # 1.1. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano.*

El día martes 19 de septiembre de 2017, a las 14:14:30 hrs., ocurrió un sismo de magnitud 7.1 en la región limítrofe de Puebla-Morelos con epicentro a 12 Km al sureste de la localidad de Axochiapan, Morelos. El epicentro fue ubicado en las coordenadas geográficas 18.4° de latitud norte y -98.72° de longitud oeste, causando un gran impacto en las localidades cercanas y ciudades importantes como Cuernavaca y la Ciudad de México<sup>(1)</sup>. La energía liberada por el sismo

reciente fue casi de la mitad respecto al terremoto del 19 de Septiembre de 1985 (UNAM-SSN, 2017). El hecho de que el tipo de sismo (intraplaca) del 19/09/2017 (Figura #1.2), de profundidad intermedia (57Km, UNAM-SSN, 2017) y localización del epicentro ocurriera apenas a 120 km al sur de la ciudad, así como el tipo de litologías por las que se transmitieron las ondas sísmicas, impidieron su atenuación, causando graves daños en gran parte del sur-oriental de la Ciudad de México. Esta porción de la capital se caracteriza por la presencia de varios sistemas de fallas de gran magnitud (regionales), por lo que, dado el terremoto reciente, pudieron ser factores que incrementaron el daño a la infraestructura urbana.



**Figura # 1.2.** Sección transversal mostrando la ubicación y tipo de sismo con intensidad 7.1 del 19/09/2017 (Figura tomada de la nota informativa del 23 de Septiembre del 2017 y emitido por el Grupo de Sismología e Ingeniería de la UNAM).

- (1) Reporte Especial. Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1)  
<http://www.cenapred.unam.mx:8080/boletinSismico/ultimo>

Debido a que no es posible prevenir este tipo de eventos naturales, es necesario colaborar con los organismos de Protección Civil (PC) para realizar mapas de riesgos integrales que consideren en los próximos manuales o normas técnicas de diseño y construcción de casa habitación: el patrón estructural (regional y local); la caracterización

y espesor del tipo de suelo; los cambios litológicos y profundidad de contacto entre materiales más resistentes respecto a los compresibles y; grado de saturación de agua, etc. Esto puede ayudar a reducir daños a la población y mitigar afectaciones graves a infraestructura civil, al reevaluar y modificar el factor de comportamiento sísmico para cada una de las zonas sísmicas de la Ciudad de México, particularmente en la denominada zona de transición.

GEOTEM y un grupo de estudiantes voluntarios de la UNAM y del IPN, como parte del compromiso social, con apoyo del grupo de Protección Civil de la Delegación Xochimilco, realizaron un levantamiento estructural detallado de las grietas y fracturas localizadas en la zona afectada por el evento sísmico. De manera simultánea se aplicó el método de Georadar (GPR, por sus siglas en inglés), para conocer la respuesta del subsuelo, contribuir con la caracterización y localización de los posibles elementos antropogénicos afectados bajo las líneas realizadas.

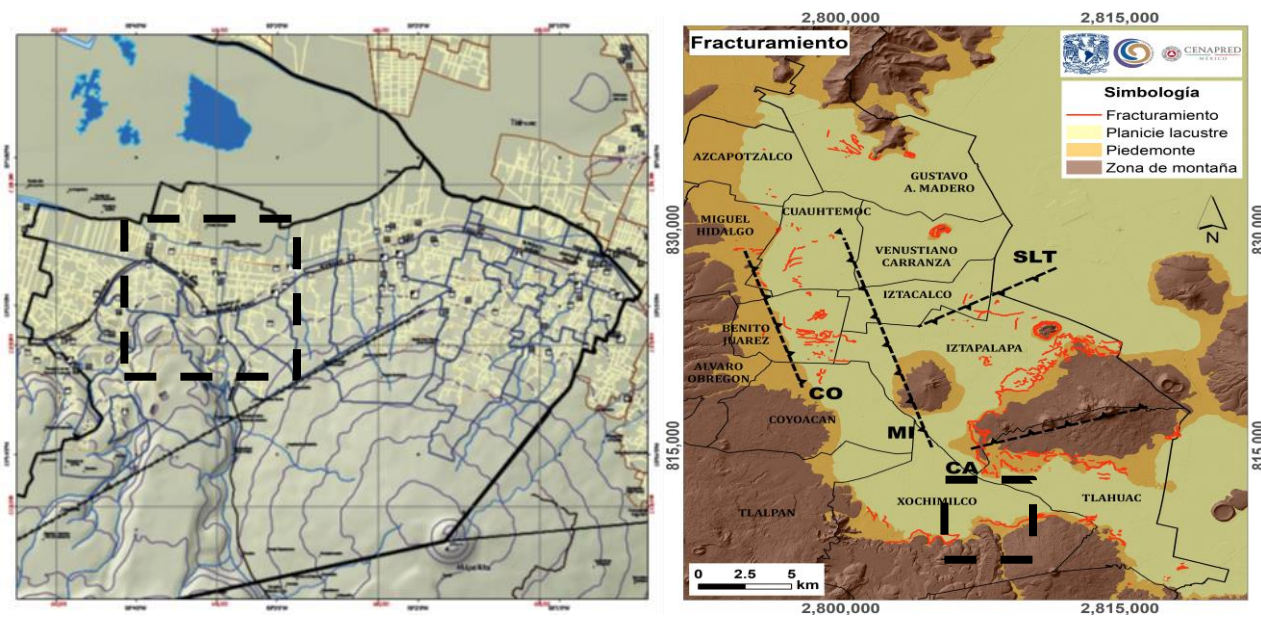
## 1.1 LOCALIZACIÓN REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ubicación geográfica del Pueblo de San Gregorio, Delegación Xochimilco está en una franja que ha sido denominada, geotécnicamente, al sur, como zona de transición II (Transición), aunque comprende también otras áreas más al norte de la zona IIID y IIIC (Lago) y que fueron previamente definidas para la Zonificación Geotécnica de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTCRCDF). La zona de transición II es una franja con un ancho de unos cuantos kilómetros y una orientación general W-E. Fue precisamente en esta zona donde la energía sísmica proveniente del SE (epicentro 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos) generó un patrón lineal de daños y cuya distribución es paralela a zonas de contacto litológico y convergencia de fracturamientos locales asociados a estructuras geológicas mayores.

De acuerdo con el Atlas de peligros y/o riesgos de la Delegación Xochimilco en el Atlas Nacional de México (Inst. de Geografía, UNAM, 1990), la zona norte es catalogada como de escasa intensidad sísmica y con baja densidad de población, mientras que la zona sur se cataloga como de media densidad poblacional.

Sin embargo, al constituir la zona de estudio parte de la Provincia Fisiográfica Trans-Mexicana, particularmente al pertenecer a la subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac, los distintos tipos de roca: basáltica y brecha volcánica de gran permeabilidad a profundidades someras y el paquete de sedimentos granulares someros (suelo blando saturado) ocasiona que tanto la amplitud como la duración del fenómeno telúrico (UNAM-SSN, 2017) hayan sido mayores en la zona de transición litológica (específicamente en límite de zona ex-lacustre), donde el periodo de oscilación tiende a ser menor, afectando principalmente a viviendas bajas (más de dos niveles) con pesadas losas de concreto.

Aunque la limitante en el uso de GPR para materiales arcillosos y saturados existe, la finalidad de este estudio fue enfocada en localizar tuberías subterráneas someras afectadas por el patrón de fracturamiento producto del sismo 19092017. Se realizó un análisis detallado del sitio. La propuesta original para los levantamientos se modificó dadas las prioridades transmitidas por personal de Protección Civil (PC). Dada la magnitud del daño causado por las ondas sísmicas, los esfuerzos se enfocaron en la zona del embarcadero (Figura # 1.3).



**Figura # 1.3.** Mapa mostrando la zona de estudio. Fuente: Atlas de peligros y/o riesgos de la delegación Xochimilco 201599 e Informe del Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG) de Freyre et al., 2016



## 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal consistió en verificar la continuidad al norte del sistema de fallas oriente-poniente dominantes de la región (Fallas Xochimilco-Xicomulco) y la posible convergencia del patrón de fracturamiento registrado con la extensión de una estructura tectónica mayor de dirección preferencial NW20°SE que se conoce al norponiente como Falla Mixhuca (Figura #1.4). De forma adicional se aplicó el método de Georadar, para conocer el grado de afectación a la red de tuberías para abastecimiento de aguas de riego debido cortejo de fracturas asociadas al sistema de fallas regionales Mixhuca y cuya orientación preferencial es NW20°SE.

Aunque el *Atlas Nacional de México*, (*Instituto de Geografía, UNAM, 1990*) tiene registro adicional de un sistema regional de fallas de dirección N45°E, este cortejo de fracturamiento aparentemente afecta más a la zona de Nativitas, al poniente de Axayopa (Figura #1.4).



**Figura # 1.4.** Mapa modificado mostrando los principales sistemas de fallamiento en la zona de estudio. A) Sistema de Fallas Xochimilco, b) Extensión del Sistema de Fallas Mixhuca, c) Sistema de Fallas Tenochtitlán. (Fuente: Protección Civil y Atlas Nacional de México, Inst. de Geografía, UNAM, 1990).

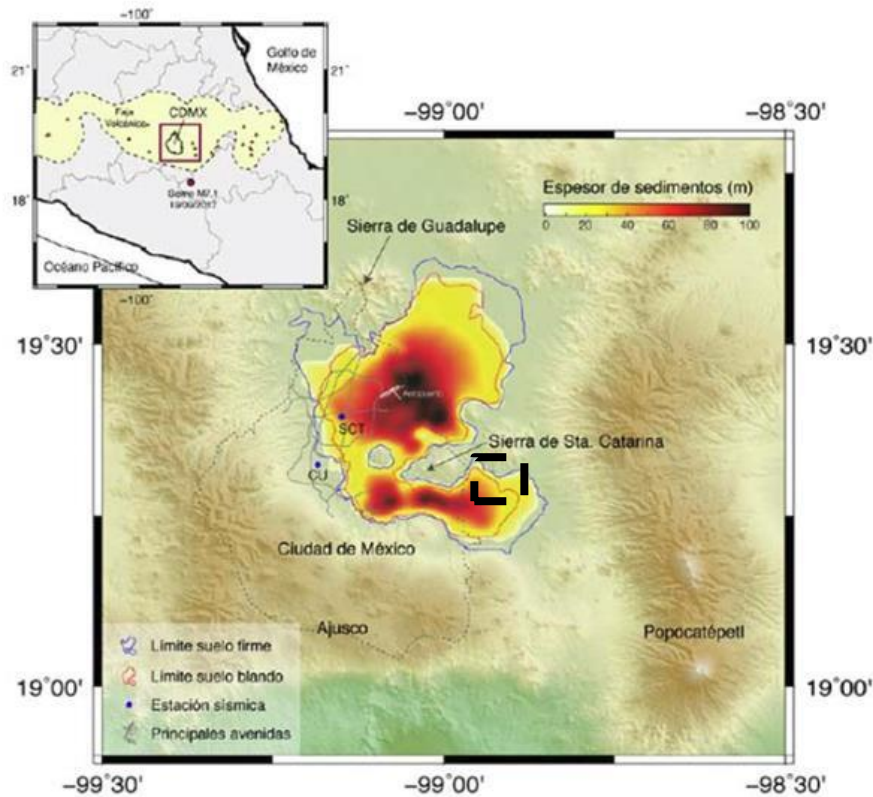
## 2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN PREVIA

---

La integración de toda la información disponible y de los trabajos de campo planificados contribuyen con la caracterización adecuada para evaluar la magnitud del daño producido. En este apartado se presenta el análisis de la información recabada previa al recorrido de campo y en el marco técnico solicitado.

Los estragos causados por el sismo 19/09/2017 fueron consecuencia del impacto de las ondas sísmicas en estructuras civiles. Esta intensidad de choque se mide como aceleración máxima (AMax) en unidades "gal" (1 gal = 1cm/s<sup>2</sup>) y fue, en suelo firme de 57 gal, casi dos veces la registrada por ondas del sismo del año 85 (UNAM-SSN, 2017). Para el caso de las Delegaciones de Xochimilco, Tláhuac e incluso parte de Iztapalapa, donde se tiene un paquete sedimentario (aluvial) de espesor variable, el comportamiento mecánico es muy distinto (diferentes zonas geotectónicas), amplificándose las ondas sísmicas al considerar incluso el grado de saturación de agua debido a las últimas precipitaciones pluviales registradas en semanas previas al terremoto.

El hecho de que esta parte de la ciudad muestre una red hidrográfica lineal abastecida predominantemente por la Sierra de Chichiuautzin y se encuentre dentro de la Región Hidrológica del Panuco (Sub-cuenca del Lago de Texcoco) con alta precipitación pluvial, aunado a la saturación hídrica del suelo dadas las lluvias torrenciales, incremento notablemente el riesgo para la población. El excelente Grupo de Sismología e Ingeniería de la UNAM ha elaborado el plano correspondiente a distribución de espesores del paquete detrítico (UNAM-SSN, 2017) y es evidente que las Delegaciones afectadas, incluyendo Xochimilco, se ubican dentro de las zonas con mayores potencias de material detrítico (Figura # 2.1).



**Figura # 2.1.** Mapa mostrando la distribución de espesores para la cuenca endorreica sedimentaria de la Ciudad de México. En el recuadro superior se muestra la cercanía del epicentro (círculo rojo) del sismo 19092017. (Figura tomada de la nota informativa del 23 de Septiembre del 2017, emitido por el Grupo de Sismología e Ingeniería de la UNAM).

## 2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Acorde con la clasificación geotécnica de la Ciudad de México, la zona de estudio se ubica en la Zona III denominada "zona de lago", que es paralela a una delgada franja de la zona II, denominada "zona de transición" y cercana a la frontera de la zona I denominada "zona de lomas". Este zoneamiento geotécnico responde tanto a la geología del centro de México, como a las estructuras regionales (cuencas y valles) y de acuerdo con el comportamiento mecánico y geometría de emplazamiento de los distintos materiales rocosos, en superficie y a profundidad.

Geológicamente, la zona de estudio se encuentra directamente al norte de la *Sierra Chichinautzin*, región caracterizada por materiales volcánicos efusivos básicos clasificados como basaltos y andesitas en coladas de lava de tipo *Pahoehoe* y *A-A*, así como la presencia de aparatos volcánicos monogenéticos, entre los que destacan el *Cerro Pelón* (cercano a la Sierra de las Cruces y con una elevación de 3400 msnm) y del *Cuatzin* (en una porción media de la sierra, y con elevación de 3495 msnm). Al pie de ambos elementos morfológicos elevados se observan numerosos conos volcánicos menores que se alinean preferentemente siguiendo el fallamiento tectónico E-W que permitió la emisión a superficie de productos efusivos, entre los que destaca la presencia del volcán monogenético *El Xitle*.

Algunos de estos rasgos estructurales resultan fundamentales para entender lo revelado por la exploración geotécnica del subsuelo en el predio estudiado; se trata de grandes fallas orientadas oriente-poniente (E-W). Hacia el poniente (justo en la esquina SW de la planicie) otro tipo de estructuras están presentes, cambiando el rumbo de su orientación a casi norte-sur (N-S).

Estas fallas han sido determinadas por otros autores como de edad terciaria y se ven claramente reflejadas en la Sierra Xochitepec, la cual representa un basamento local sobre el que se alojaron tanto los numerosos flujos de lava como la secuencia aluvial-lacustre que rellenó parcialmente el fondo de la cuenca y formó la extensa planicie sobre la que se edificó la Ciudad de México.

La zona de estudio está emplazada por tanto sobre sedimentos detríticos aluviales recientes y poco compactados del Cuaternario. Los espesores pueden incluso ser considerables y consisten de arcillas y arenas acumulados en el centro de la Cuenca endorreica de México, depositándose en la depresión del lago (cuya formación es posteriormente a la Sierra Chichinautzin). No se presentan cambios topográficos sobresalientes, sin embargo, la presencia de pequeños lomeríos revelan las posibilidades de encontrar materiales volcánicos a profundidad como basaltos y andesitas provenientes de las coladas de lava expulsadas por los volcanes monogenéticos de la zona (Figura # 2.2).

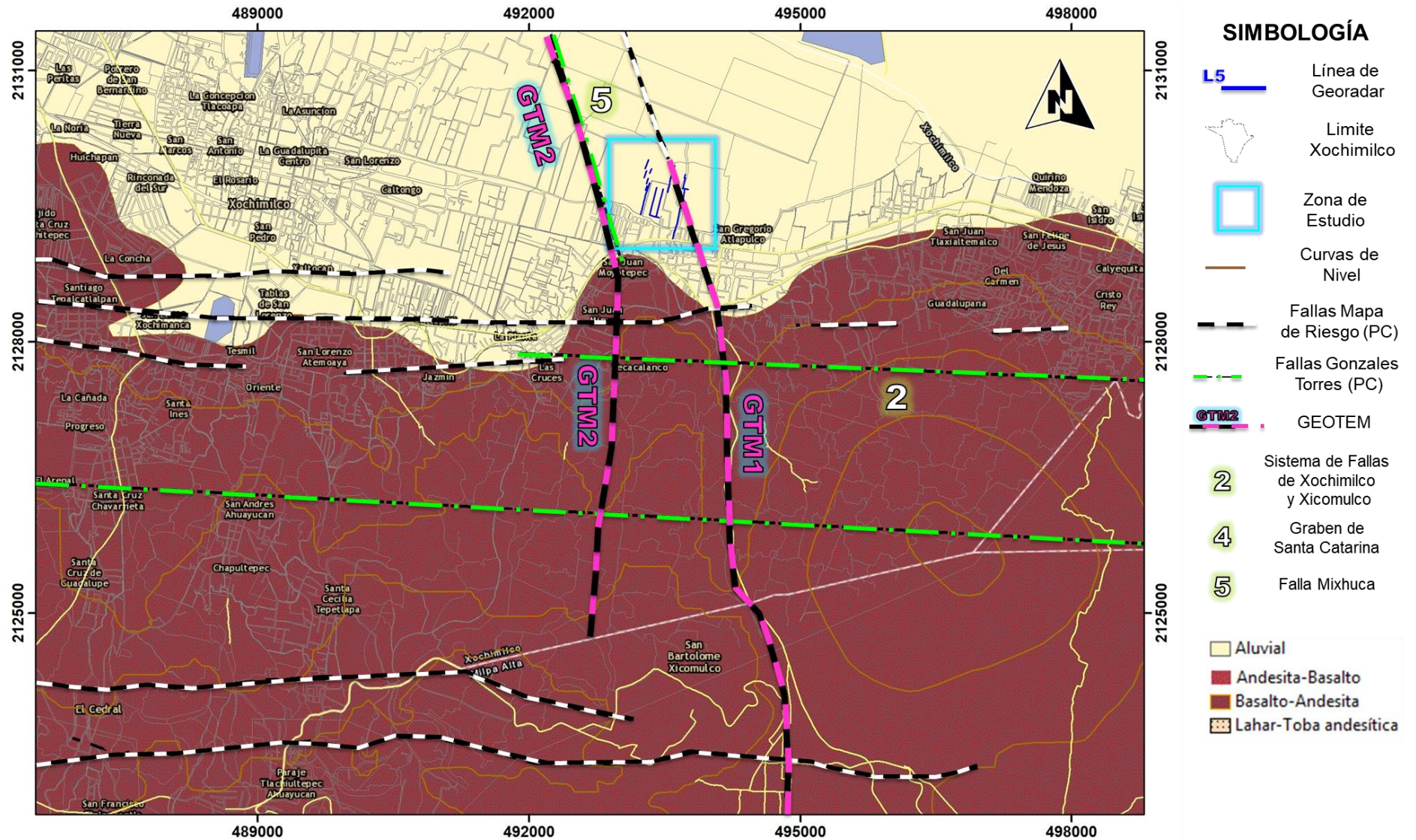


Figura # 2.2 Mapa Geológico Regional de la zona de estudio. (Datum WGS 84)

## 2.2 MAGNETOMETRÍA AÉREA REGIONAL

Mapas combinados de información geofísica y geológica pueden conducir a la localización de estructuras semiprofundas y a la discriminación litológica. Una anomalía magnética se asocia a la magnetización remanente en las rocas que componen la corteza terrestre y al contenido de minerales ferromagnéticos de las mismas, siendo la unidad de medida los nano-Teslas (nT). Mientras mayor sea el contenido de minerales con propiedades magnéticas (rocas volcánicas), mayor será su respuesta en intensidad magnética.

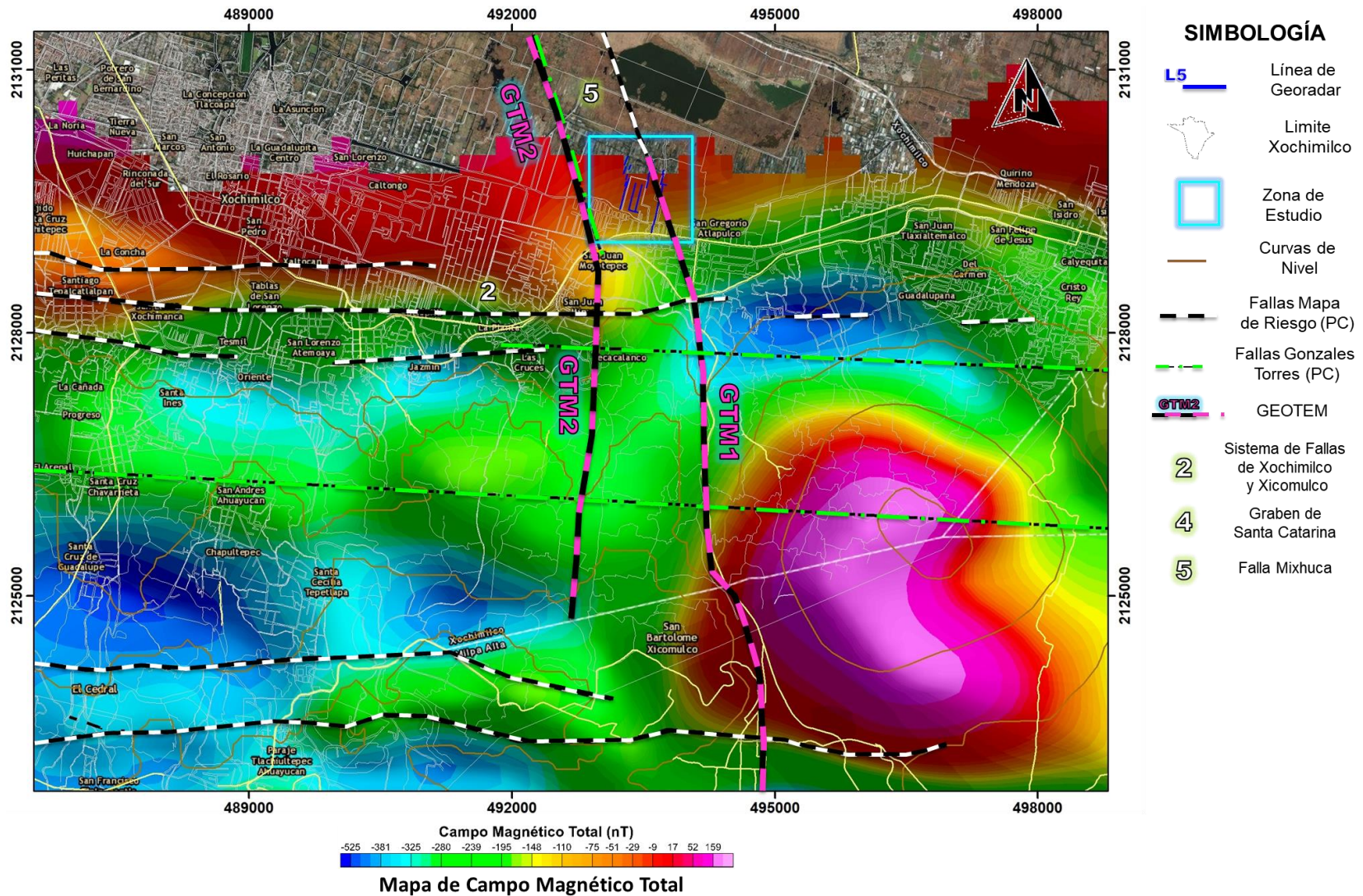
Los mapas mostrados en este reporte, aunque no forman parte del apoyo de voluntariado de la brigada, fueron realizados previamente por Geotem, a partir de levantamientos magnéticos aéreos adquiridos del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Los mapas indicados en el texto fueron procesados, arrojando información sobre la distribución litológica de la corteza continental en la zona de estudio.

### 2.2.1 Mapa magnético Campo Total

El mapa magnético de Campo Total (obtenido SGM), muestra la variación y distribución de la intensidad de campo magnético presente en el área de estudio (Figura 2.3). El análisis de campo total, de acuerdo con la latitud geográfica de la zona, permite identificar patrones de anomalías dipolares producidas por cuerpos o rocas a profundidad con propiedades ferromagnéticas y sus asociaciones mineralógicas, lo que permite en consecuencia zonificar diferentes ambientes geológicos producto de las respuestas detectadas y asociadas a las formaciones en profundidad.

Cerca de la zona de interés destaca el cambio entre un alto (color rojo-cian, Sierra Volcánica) y un bajo magnético (color azul, Zona del Lago) con dirección preferencial que coincide tanto con las litologías propias de la Sierra de Chichinautzin como con el sistema de fallas oriente-poniente (Fallas Xochimilco-Xicomulco) que basculan (inclinan) hacia el norponiente y que evidentemente zonifica un par de ambientes geológicos producto de la respuesta magnética detectada de las formaciones y/o estructuras volcánicas y sedimentarias (Figura # 2.3)





**Figura # 2.3.** Mapa del Campo Magnético Total. En recuadro se indica la zona estudiada.

### 2.2.2. Mapa magnético de reducción al polo

El mapa de Reducción al Polo se calcula mediante un proceso matemático y, a diferencia del mapa magnético de Campo Total anterior cuya posición geoespacial no se encuentra bien definida, con el procesamiento de los datos por reducción al polo, se puede ubicar la posición (X,Y) de los cuerpos con propiedades ferromagnéticas, su geometría o extensión en superficie, así como los contrastes laterales asociados a estructuras geológicas profundas por medio de intensidades magnéticas registradas y que destacan por medio de anomalías dipolares. Estas anomalías son generalmente indicadoras de procesos tectónicos que se han presentado en la zona.

Con la corrección geoespacial de las anomalías magnéticas fue posible asociar las diferentes estructuras geológicas en la región de Xochimilco; sobresalen los cuerpos volcánicos paralelos al sistema de fallas Xochimilco-Xicomulco en la parte sur y poniente del mapa (Figura # 2.4). Lo más importante de este mapa es destacar la región frontal de la Sierra de Chichinautzin, donde solo se registraron valores menores a -200 nT (color azul, Zona de Lago). Tales anomalías se asocian directamente con zonas de depósitos sedimentarios detríticos, mostrando por tanto su distribución al norponiente de la zona de estudio, donde tienden a incrementarse los espesores y que abarca gran parte de la Delegación de Xochimilco particularmente en el área de Nativitas.

### 2.2.3. Mapa magnético señal analítica

El procesado de datos por medio de un operador matemático permite delimitar aquellas zonas con fuerte respuesta magnética, particularmente resaltando los bordes o límites de cuerpos magnéticos a profundidad (rocas volcánicas). El proceso (segunda derivada del campo, en dirección X, Y y Z), permite una aproximación congruente y adecuada respecto a la geometría de los cuerpos profundos, destacándose morfologías o extensión de los cuerpos geológicos sub-superficiales.

En el mapa de señal analítica propuesto se aprecia la delimitación de una serie de anomalías en la dirección oriente-poniente y que coinciden también espacialmente con la dirección oriente-poniente de las fallas regionales (Xochimilco-Xicomulco) de mayor





longitud y magnitud registradas. De acuerdo con los valores, distribución y las formas de las anomalías fue posible delimitar la extensión de las unidades volcánicas y que se encuentran justamente delimitando la zona de transición (II) de la zona de lago (III), tal como se indica en el recuadro de la Figura # 2.5, precisamente acotando la zona de estudio del Barrio de San Gregorio. El mapa de señal analítica también permite inferir la continuidad del sistema de fallas Mixhuca y que bordean a edificios volcánicos, particularmente en la margen occidental del Volcán Tehutli, al sur de San Gregorio.

#### **2.2.4. Mapa magnético derivada TILT**

Un mapa especialmente útil generado a partir de datos geofísicos es el procesamiento y la elaboración del denominado mapa con Derivada Tilt. Este procesado permite eficientemente identificar la respuesta de alta frecuencia producida por rasgos estructurales con respecto a las variaciones angulares del sustrato rocoso.

En el mapa de la zona de estudio del Barrio de San Gregorio se aprecian diversos alineamientos (grupos de fracturamiento y grietas paralelas) que, aunque marcadamente evidentes, fueron catalogados como inferidos en mapas. Este patrón de estructural es similar y paralelo a la orientación preferencial descrita en el mapa de reducción al polo, aunque que se presenta mucho mejor definido.

Los lineamientos con esbeltos rasgos estructurales parecen estar intrínsecamente relacionados y en correspondencia con la dirección de los principales planos de fallas del sistema Xochimilco-Xicomulco y que marcan la franja del límite de la delgada zona de transición (Figura # 2.1) geotécnica II (o “zona de transición”) en el centro del recuadro de la Figura 2.6, respecto a la zona III o “zona del lago”, y la correspondiente a zona I o “zona de lomas” al sur y asociada a la distribución de aparatos volcánicos.

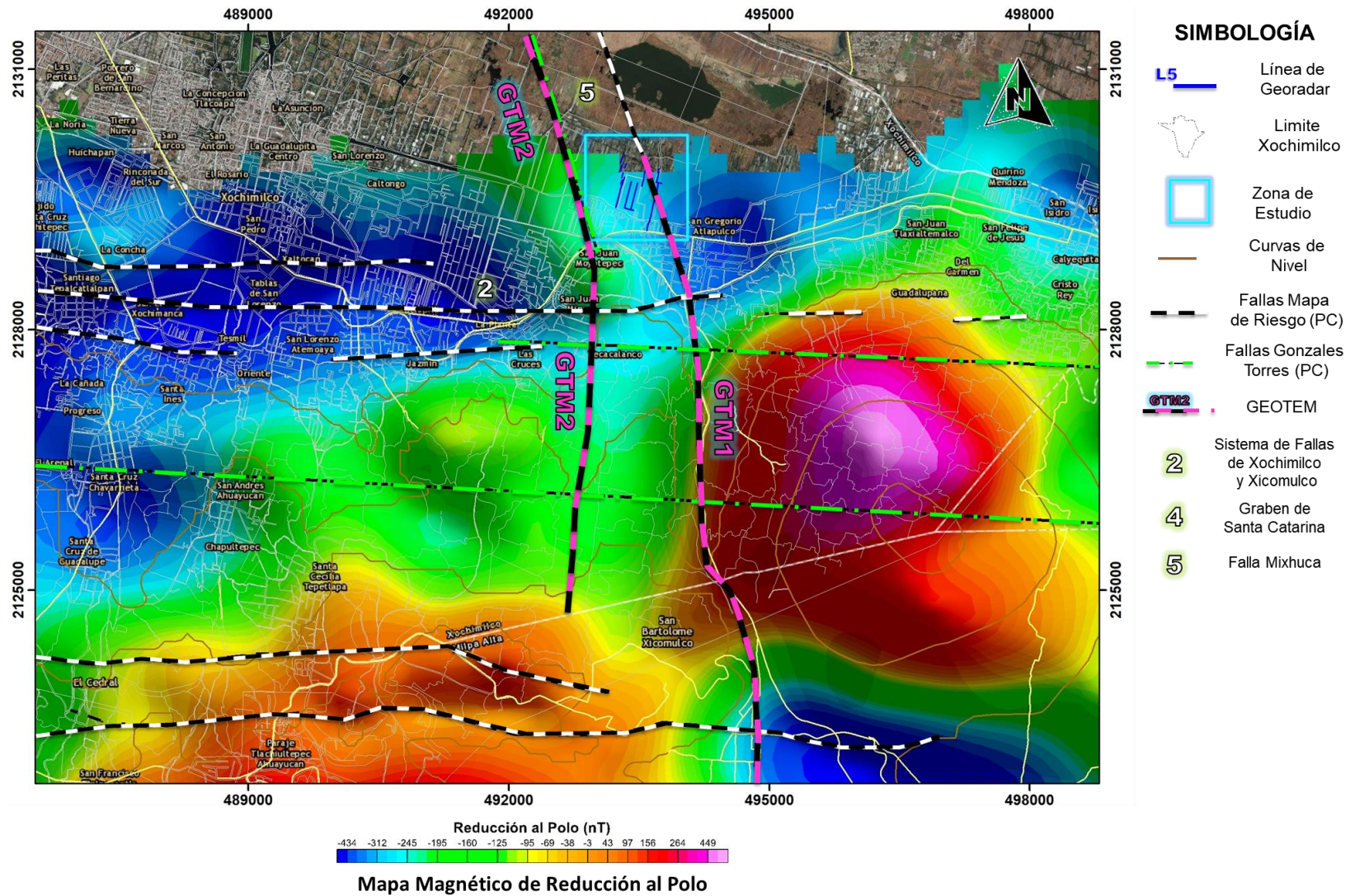
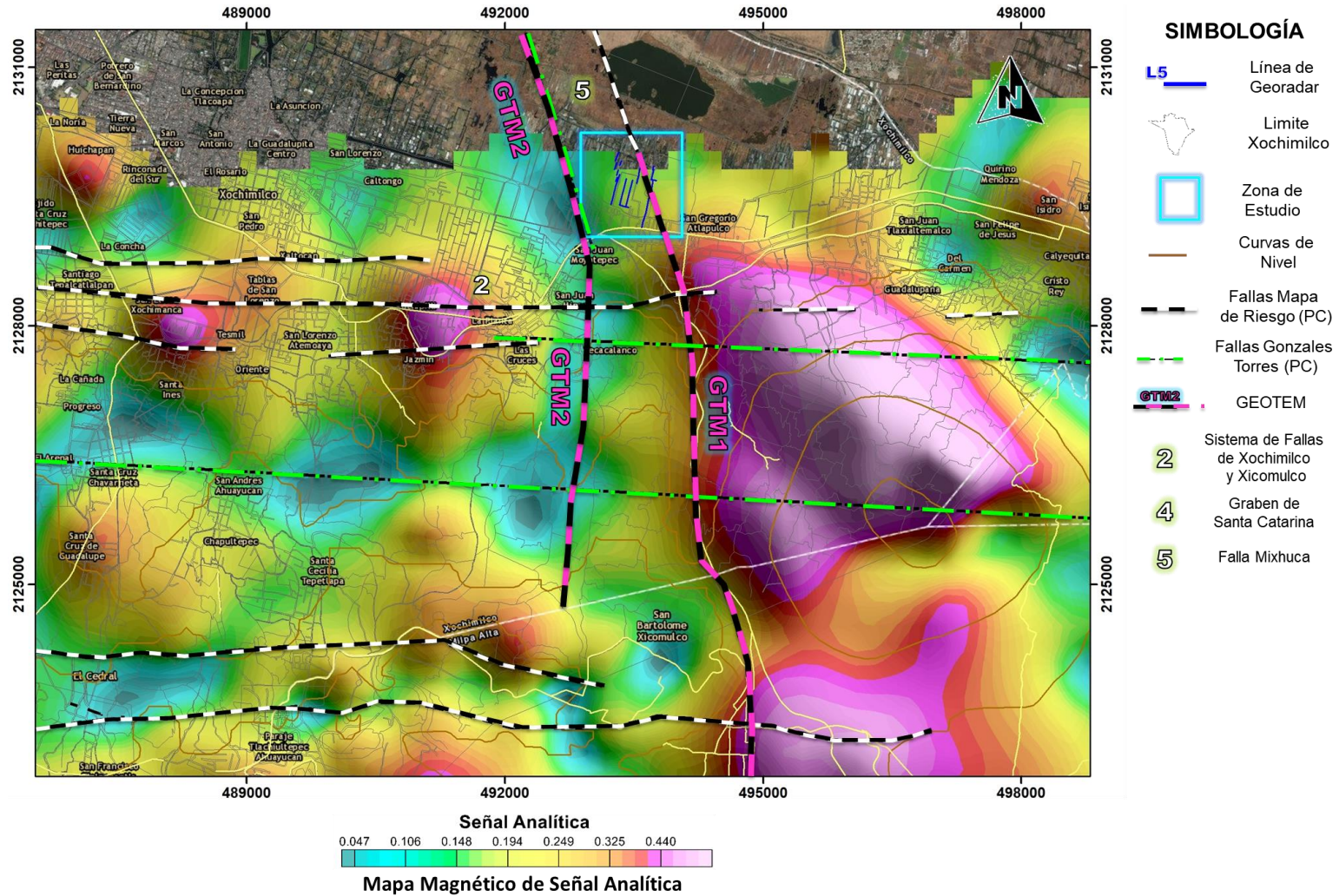


Figura # 2.4. Mapa magnético de Reducción al Polo. En recuadro se indica la zona estudiada.



**FIGURA # 2.5** Mapa magnético de señal analítica. En recuadro se indica la zona estudiada.

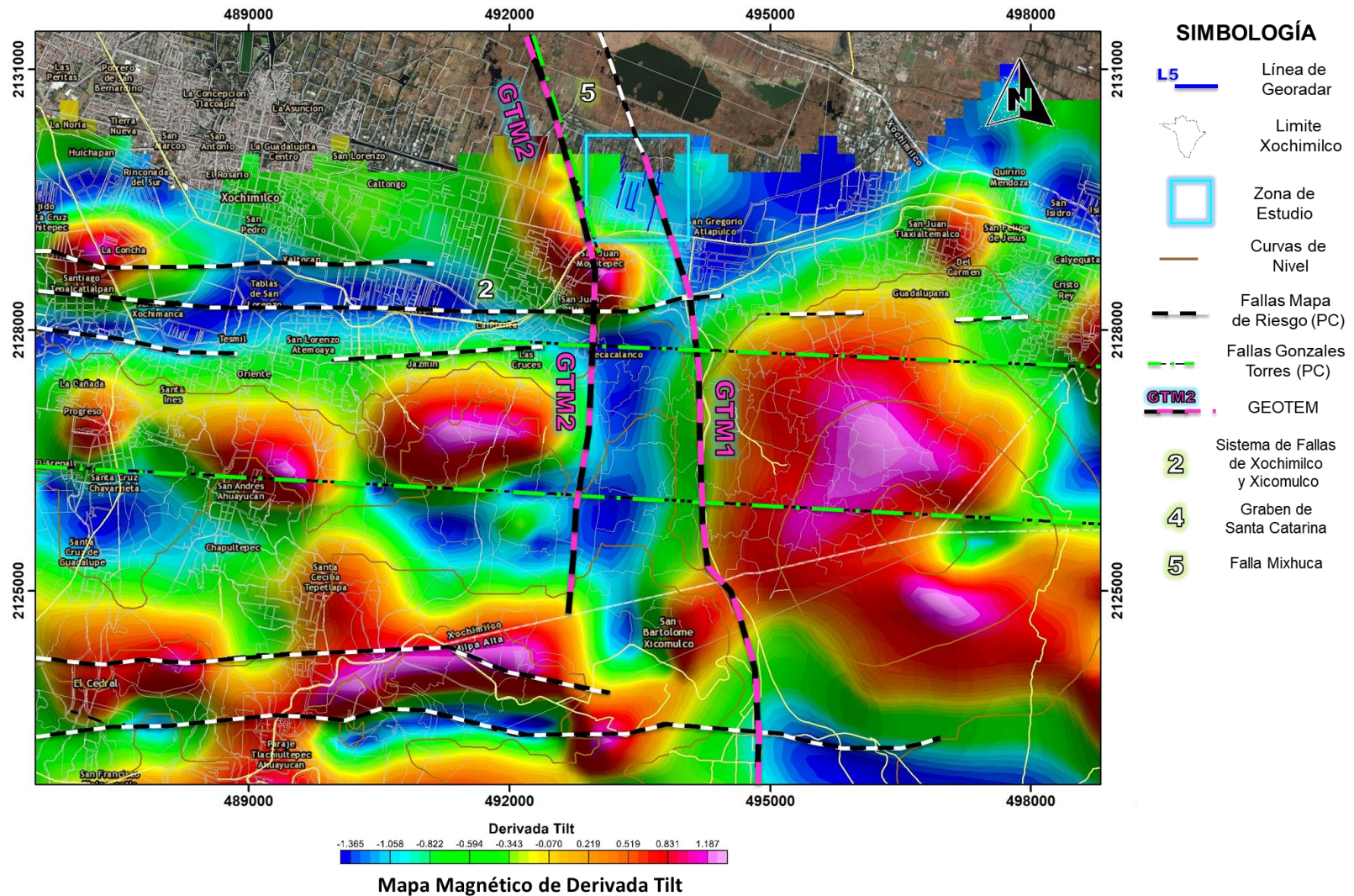


Figura # 2.6. Mapa magnético de Derivada Tilt. En recuadro se indica la zona estudiada.

## 2.3 RESULTADOS DE GRAVIMETRÍA EN LA ZONA

En el método geofísico de exploración gravimétrica consiste en la medición de un valor relativo de gravedad de una zona en particular y que permite definir cuerpos geológicos del subsuelo fundamentado en el contraste de densidades que entre distintas unidades se presentan. Con el procesamiento de los datos gravimétricos adquiridos se procede a la elaboración de perfiles y mapas para su posterior interpretación.

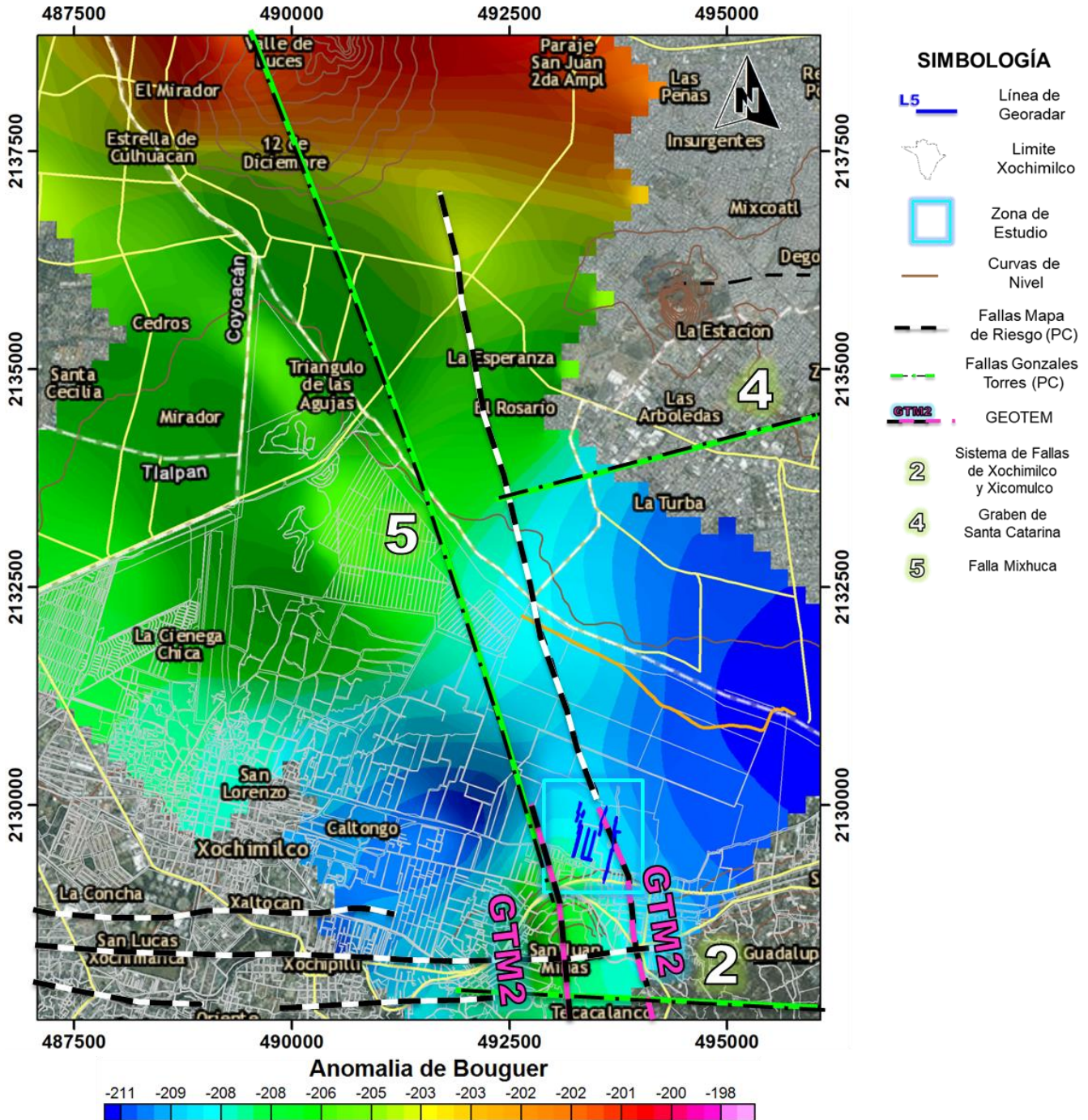
La anomalía de Bouguer es la diferencia entre el valor de gravedad observado (gobs), ajustada por la suma algebraica de todas las correcciones necesarias respecto la gravedad en alguna estación base (gbase).

### 2.3.1 Mapa Regional Anomalía de Bouguer

La distribución de las anomalías gravimétricas es un reflejo de las variaciones tanto de la densidad de las rocas de la corteza terrestre como de su estructura, aunque también permite inferencias fidedignas respecto a su geometría o distribución.

La variación de la anomalía de Bouguer adquirida puede reflejar por tanto variaciones laterales de acuerdo con el perfil levantado y de acuerdo con la densidad de los distintos materiales en el subsuelo y como características de contraste de medios de alta densidad en medios de baja densidad y que puede ser definida por levantamientos positivos de la anomalía de Bouguer y viceversa (Telford, et al. 1990).

En Figura # 2.7 se presenta el Mapa Gravimétrico de Anomalía de Bouguer levantado por GEOTEM en el año 2011, como parte de trabajos de investigación de la empresa, y el recuadro azul cian se indica la zona estudiada, apreciándose como el núcleo poblacional sur de San Gregorio se asienta sobre materiales volcánicos más competentes, aunque cercanamente asociados a fallas regionales oriente-poniente (marcada con el numero 2). En contraste, la zona agrícola de la zona norte de San Gregorio, directamente al norte y en dirección al lago, está asentada preferencialmente sobre materiales sedimentarios aluviales, donde se presentan colores azules de acuerdo con el Mapa de Anomalía de Bouguer.

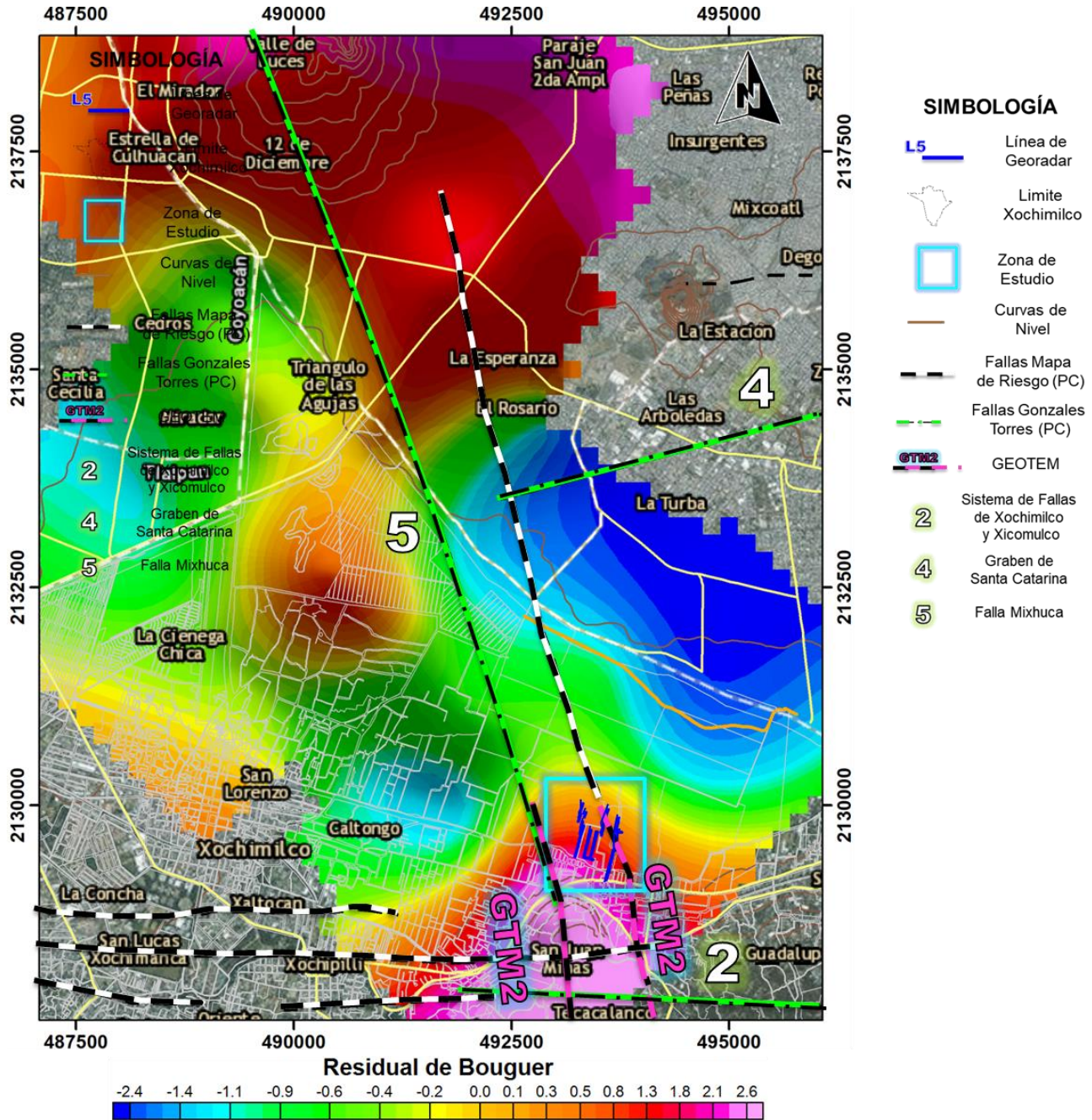


**Figura # 2.7.** Mapa gravimétrico de la Anomalia de Bouguer con el área estudiada (GEOTEM 2011).

### 2.3.2 Mapa Regional Residual de Anomalía de Bouguer

El mapa de Residual de Anomalía de Bouguer (RAB) tiene como objetivo realzar rasgos de interés geológicos, separando las contribuciones superficiales y profundas de la anomalía de Bouguer, siendo por tanto de gran utilidad. Se enfatizan una serie de rasgos locales, los cuales delimitan una dirección preferencial del comportamiento del subsuelo y que, en la zona de estudio, delimita la zona del lago al norte con respecto a la zona con incremento topográfico al sur (Figura # 2.8). El mapa gravimétrico levantado permite asociar materiales aluviales sedimentarios de menor densidad en comparación con los cuerpos y depósitos volcánicos del sureste, tal como se aprecia en la Figura # 2.8.

Nuevamente la zona del Barrio de Xochimilco, como se indica en el recuadro de la figura anterior, está ubicado geográficamente en la delgada franja limítrofe entre las zonas geotécnicas I y III. El mapa permite distinguir precisamente que el área sur, donde mayores problemas de fracturamiento y estabilidad se reportaron en el Barrio de San Gregorio después de sismo del 19092017, está asentado precisamente en la zona de transición de las dos litologías dominantes, aunque aparentemente más próximo a la región donde los paquetes detríticos aluviales tienden a incrementar su espesor.



## Mapa Residual de Bouguer

Figura # 2.8. Mapa gravimétrico Residual de Anomalía de Bouguer (GEOTEM,2011)

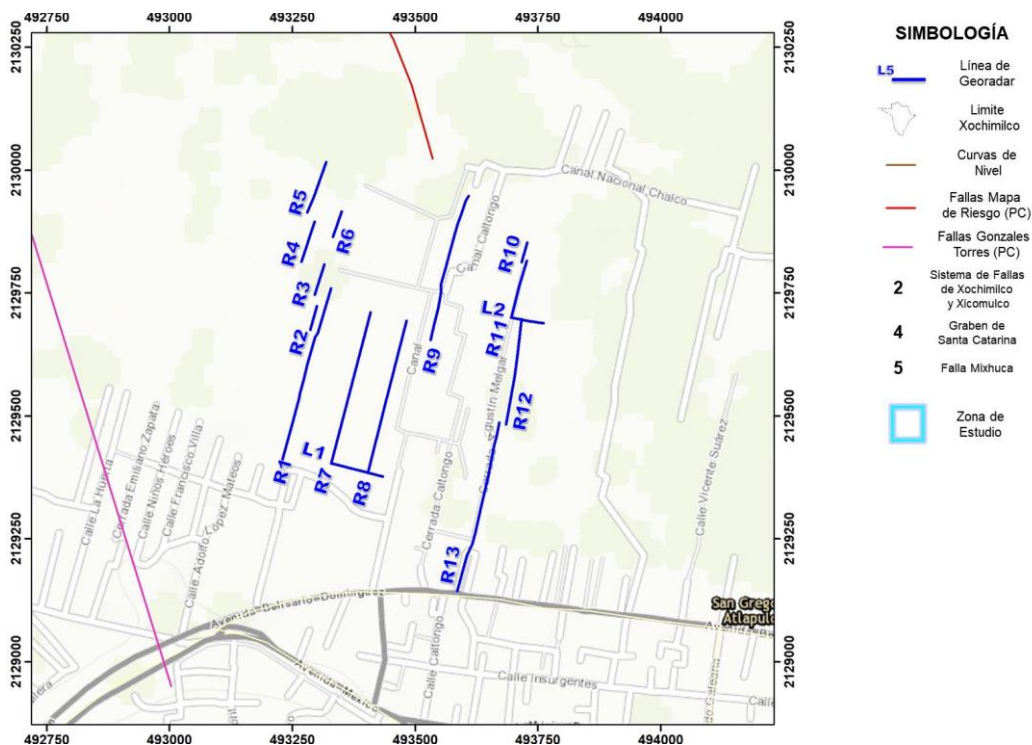


### 3. ACTIVIDADES DE CAMPO Y RESULTADOS

#### 3.1 PLANEACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE CAMPO

Se iniciaron las actividades de campo, con un reconocimiento del sitio por medio de una inspección visual y toma de datos estructurales. Con esta información se diseñó el plan de trabajo y se realizó un levantamiento más detallado de las grietas y fracturas identificadas en la región. Posteriormente se llevó a cabo el levantamiento con el método de Georadar (GPR), para conocer la respuesta del subsuelo e identificar los posibles elementos antropogénicos localizados bajo las líneas realizadas. La toma de datos estructurales se llevó a cabo de forma conjunta con el estudio por GPR.

El programa incluyó el análisis sucinto del comportamiento estructural del pavimento y de casas, así como la intensidad y frecuencia de recientes fracturas y fallas registradas en suelo. Los puntos de muestreo y líneas de recorrido GPR se indican en la Figura # 3.1.



**Figura # 3.1.** Mapa mostrando sitios del estudio realizado por GEOTEM y brigada voluntaria conjunta de estudiantes UNAM-IPN. Líneas "R" con orientación NE-SW, líneas "L" con orientación aproximada oriente-poniente.

### **3.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE SAN GREGORIO, XOCHIMILCO.**

Dado que uno de los objetivos principales se enfocó en determinar si existe continuidad del sistema de fallas regionales con rumbo preferencial NW20°SE y que no está definida en la zona de San Gregorio, pero que está identificada en el NW de la Ciudad de México, desde la zona sur-poniente de Iztapalapa y Tláhuac, se tomaron datos de fracturamiento y fallamiento en diferentes transectos. Los datos considerados en bitácora consistieron en rumbo de fracturas, dirección de inclinación (en caso de poderse medir) y profundidad de fracturas.

Con los datos recopilados en campo se definieron tres sistemas estructurales generales de acuerdo con el rumbo medido y su intensidad de frecuencia:

- A) Sistema E-W: Rumbo de fracturamiento NW 75 a 85° SE, inclinación desde 70° hasta 82° con inclinación tanto al NW como al SE, ancho promedio de fracturas de 2 a 8 cm y profundidad de fracturas en rango que va desde los 8 hasta 56 cm.

La consecuencia de mecánica de onda de este sistema de fracturas afecto principalmente los contactos entre estructuras verticales de soporte de casa habitación (Figura # 3.2). La intensidad del fracturamiento (profundidad máxima medida en campo) es mayor para este grupo de fracturas hacia la zona norte de San Gregorio. Aunque la profundidad máxima documentada fue de 56 cm, algunas casas sufrieron un asentamiento máximo de hasta 5 cm.



**Figura # 3.2.** Patron de fracturamiento en casa habitación asociado al sistema de fracturamiento principal NE 75 a 85° SW.

B) Sistema NS: Rumbo de fracturamiento NE 15 a 23° SW, inclinación vertical, ancho promedio de fracturas de 0.5 a 7 cm y rango de profundidad de fracturas desde 3 hasta 18 cm. Este sistema es casi ortogonal respecto al registro anterior y la frecuencia de fracturamiento (número de fracturas por unidad de área) es mayor hacia la zona norte de San Gregorio, en dirección a la laguna (Figura # 3.3). La mayor afectación en casas habitación ocurrió predominantemente en paredes (Figura # 3.4), siendo el asentamiento máximo registrado de entre 12 – 15 cm de profundidad.



**Figura # 3.3.** Patron convergente de fracturamiento en concreto de callejones del Barrio de San Gregorio. Se muestran los dos sistemas generales de fracturamiento dominantes A y B en línea

gruesa y un subsistema menor fracturamiento con línea punteada.



**Figura # 3.4.** Bardas de casas habitación del Barrio de San Gregorio mostrando los efectos de la familia de fracturas generales del sistema B.

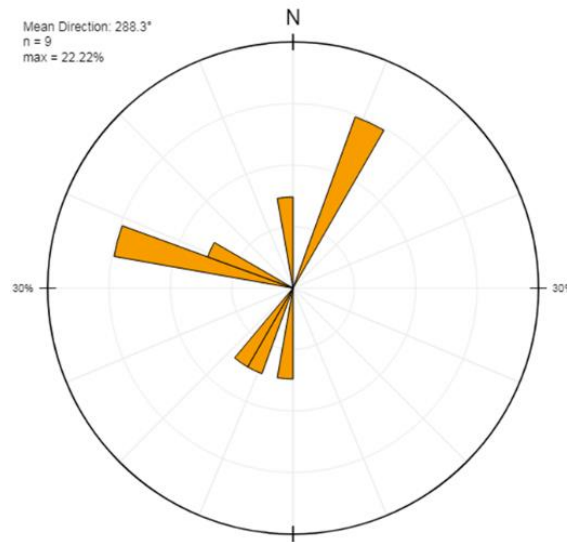
C) Sistema NW: Rumbo de fracturamiento NW 10 a 15° SE, con inclinación vertical, ancho promedio de fracturas de 8 cm y rango de profundidad de fracturas desde 15 hasta 27 cm. Aunque no es abundante esta familia de fracturas, están presentes mayoritariamente en la región norte de la zona. A diferencia de las familias A y B anteriores, existen como agrietamientos orientados (Figura # 3.4), evidentemente recientes, tanto en casas habitación, en concreto de pasillos e incluso en suelo de uso agrícola.

El efecto integral del impacto de las ondas sísmicas en la región de San Gregorio y de acuerdo con las familias de fallas y fracturas documentadas (Figuras # 3.4 y 3.5) se puede clasificar en tres tipos:

- Fracturamiento vertical en zonas de contacto de estructuras civiles y con apertura de entre 2-3 cm, consecuencia del sistema de fracturamiento A y que es subparalelo al sistema de fallas regionales E-W.
- Fallamiento con desplazamiento vertical por asentamiento asociado a los sistemas

de fallas y fracturas A y B (Figura # 3.6).

- c) Subsistencia escalonada local en el rango de 30 cm hacia el N-NW, en dirección de la zona de la laguna, con agrietamientos oblicuos NW-45°SE, que han roto las tuberías de conducción para abastecimiento de aguas de riego y cuya orientación es N-S.



**Figura # 3.5.** Roseta estructural mostrando las tres familias de fallas y sistemas de fracturamiento de la zona de San Gregorio, Delegación Xochimilco.

### 3.3 EXPLORACIÓN POR GEORADAR

Simultáneamente al levantamiento estructural se planificó la campaña para medición con Radar de Penetración Terrestre (GPR). La técnica de georadar es un método no invasivo ni destructivo, permitiendo ver elementos del subsuelo. El uso de GPR es muy amplio en diversas partes del mundo y en muy distintos campos de aplicación dado que permite la detección de cavernas, canales y túneles enterrados, plumas de contaminación, la condición de núcleos de presas, estructuras de mampostería y pilares de puentes, así como detectar objetos enterrados, entre otros.



**Figura # 3.6.** Construcción habitacional en la zona norte de San Gregorio, Delegación Xochimilco. La estructura, aunque no sufrió daños significativos, el desplazamiento asociado a una sutil subsidencia desplazo a ésta en las direcciones correspondientes a los sistemas de fracturamiento A y B. El hundimiento es de 10 a 12 cm y con una inclinación de 70° hacia el NW.

El estudio NO consistió en determinar contactos litológicos ni patrones ocultos de fracturamiento/fallamiento a profundidad en suelo arcilloso y saturado, sino que contribuyo en la identificación y caracterización de tuberías ocultas y/o socavones (oquedades) que hubiesen sido afectados por el fracturamiento documentado en superficie como consecuencia del sismo 19-09-2017, así como también el de determinar aproximadamente el intervalo aproximado donde los suelos someros cambian a unidades detríticas, siempre y cuando se distinga un distinto y evidente comportamiento petrofísico (i.e.: contacto sedimentos detríticos superficiales-suelos compactados).

La finalidad del estudio fue identificar en las imágenes de radar adquiridas, el cruce con tuberías hidráulicas, sanitarias y eléctricas, las cuales se resaltaron con curvas conocidas como hipérbolas en color azul cian; elementos antropogénicos en general con hipérbolas color azul oscuro; cambios horizontales del subsuelo, con líneas segmentadas color verde claro; y zonas anómalas (cuadros color magenta). Las zonas anómalas destacan por la atenuación que presenta la señal en las imágenes de radar y se resaltan con cuadros color magenta, lo que se interpreta como una distribución más heterogénea de los materiales,

asociados con materiales con menor contenido de finos e incluso la presencia de porosidad y/o pequeñas grietas.

Todas las líneas se realizaron con la finalidad de obtener información a partir de este método, con una distribución óptima de las líneas y los resultados que presentan las imágenes de Georadar, son producto de las condiciones actuales del sitio, por lo que es necesario verificar por medio de métodos directos para conocer la naturaleza de las zonas anómalas.

El equipo utilizado fue un Duo-IDS al cual se acoplaron 2 antenas blindadas de 250 y de 700 MHz para lograr imágenes con profundidades penetración de 5 y 3 m respectivamente. Todas las líneas, así como los puntos de verificación fueron adecuadamente georeferenciados en imágenes y planos previamente adquiridas, generando archivos específicos de la zona de estudio. El trabajo realizado consistió en 15 líneas con un volumen total de exploración 2600 m lineales (Figura # 3.7).

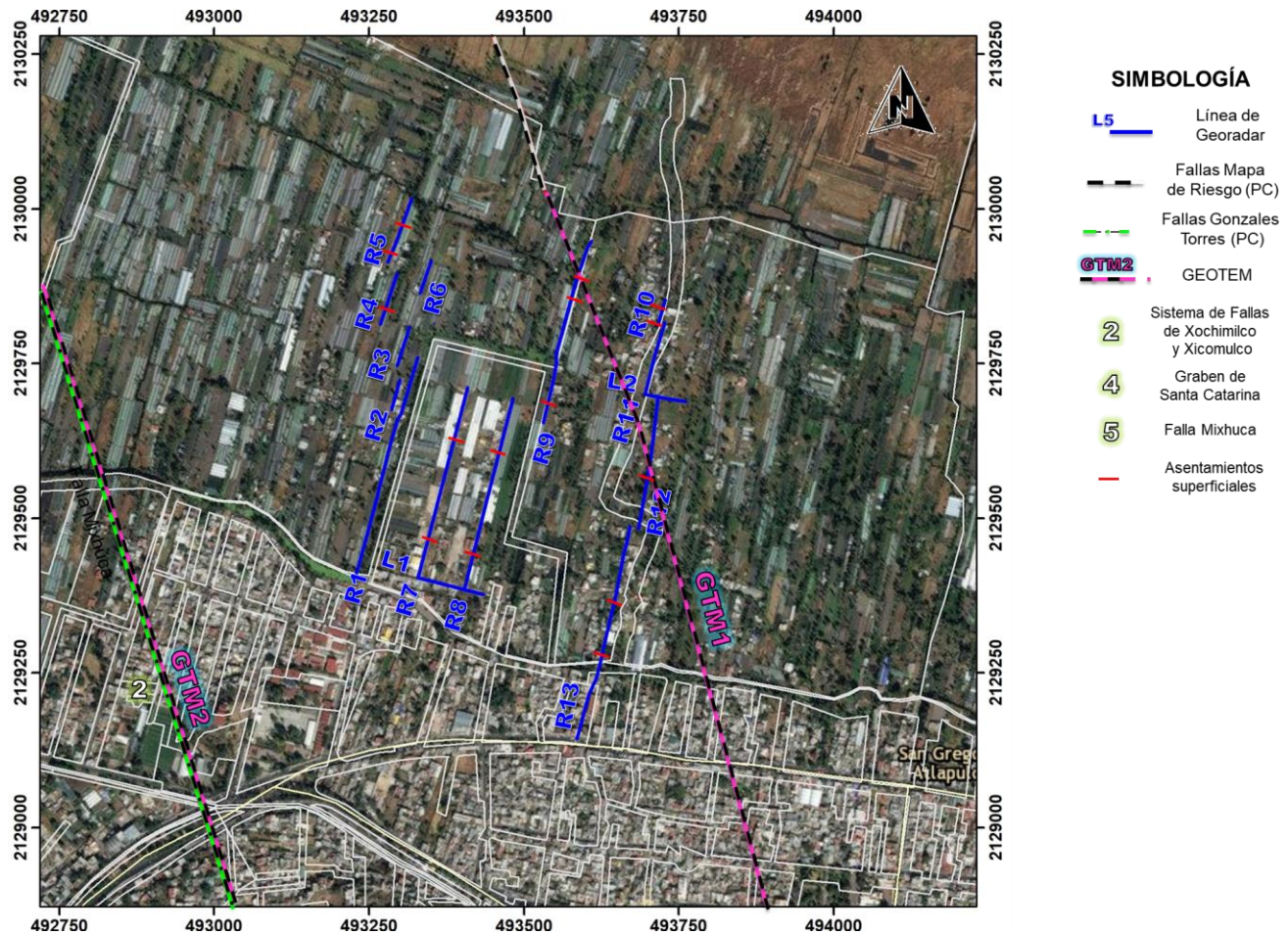
De estas líneas de investigación, 13 fueron dirección general NE-SW (R1 a R13) y 2 con orientación aproximada E-W (L1 y L2) perpendiculares a las anteriores. La interpretación de los radargramas no fue directa, sino que se realizó un mínimo proceso de imágenes y que consistió únicamente en superponer ambos radargramas 250 y 700 (sin uso de filtros o aplicación de transformadas) intentando minimizar el "ruido" propio del medio e incrementar la relación señal/ruido, permitiendo en consecuencia resaltar elementos específicos del subsuelo.

### **3.3.1 Zona Anómala**

Esta zona se refiere a los sitios en donde la continuidad lateral o vertical de la señal presenta un cambio debido a la pérdida de energía que sufre el frente de ondas electromagnético al cruzar diferentes medios del subsuelo, lo cual se distorsiona la señal cuando cruza por diferentes tipos de medios (pierde energía), con porosidad intrínseca al medio, cavernas y/o cavidades, lo que es notable en las imágenes de Georadar, por medio de grandes franjas horizontales en tonos grises a blanco.

Este efecto se verificó en el cruce de los puentes y otros elementos antropogénicos

presentes en superficie.



**Figura # 3.7.** Mapa mostrando la distribución de las líneas para estudios por GPR en la zona de San Gregorio, Xochimilco, resaltando en rojo las grietas con asentamientos.

La finalidad principal del estudio fue identificar con las imágenes de radar obtenidas la existencia y la profundidad de **tuberías hidráulicas y/o sanitarias que supusieran un riesgo directo para la población, al encontrarse fracturadas y generando posibles colapsos del terreno dado que, durante la etapa de planificación, se comprobó que sucede.** La nomenclatura que se usó en los radargramas y la forma en que se reporta en el presente informe fue la siguiente:

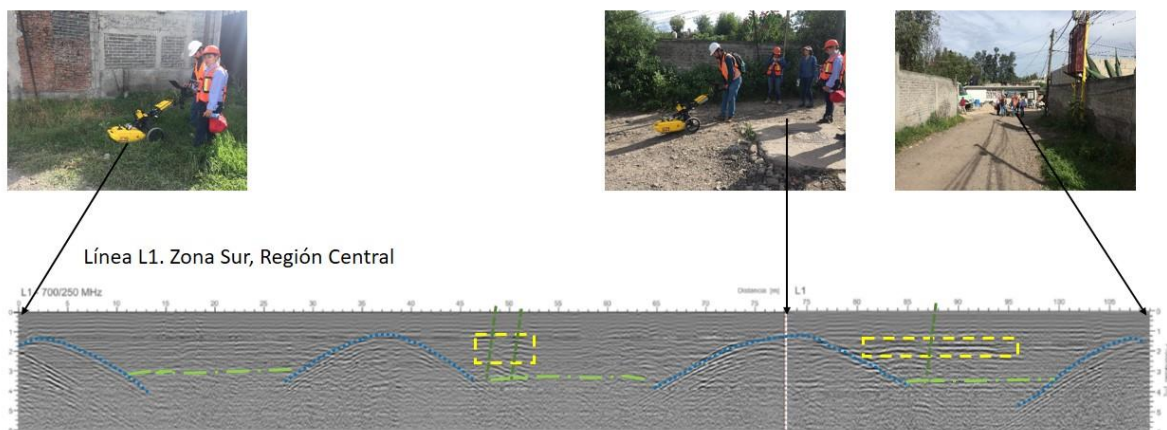




- 1) **Tuberías**, se resaltaron con curvas hipérbolas en color azul-cian
- 2) **Elementos antropogénicos**, con hipérbolas color azul oscuro
- 3) **Cambios horizontales del subsuelo**, con líneas segmentadas color verde claro
- 4) **Zonas anómalas** resaltados en recuadros color amarillo
- 5) **Fracturas** en color verde oscuro

Las líneas L1 y L2 tienen dirección preferencial E-W y son casi perpendiculares a la distribución de tubería subterránea que se usa para riego en las zonas de cultivo. L1 se llevó a cabo al sur y L2 en la parte norte de la zona de estudio. Estas líneas (L) también son ortogonales a las líneas R de GPR orientadas grosamente N-S (NE 10-15° SW).

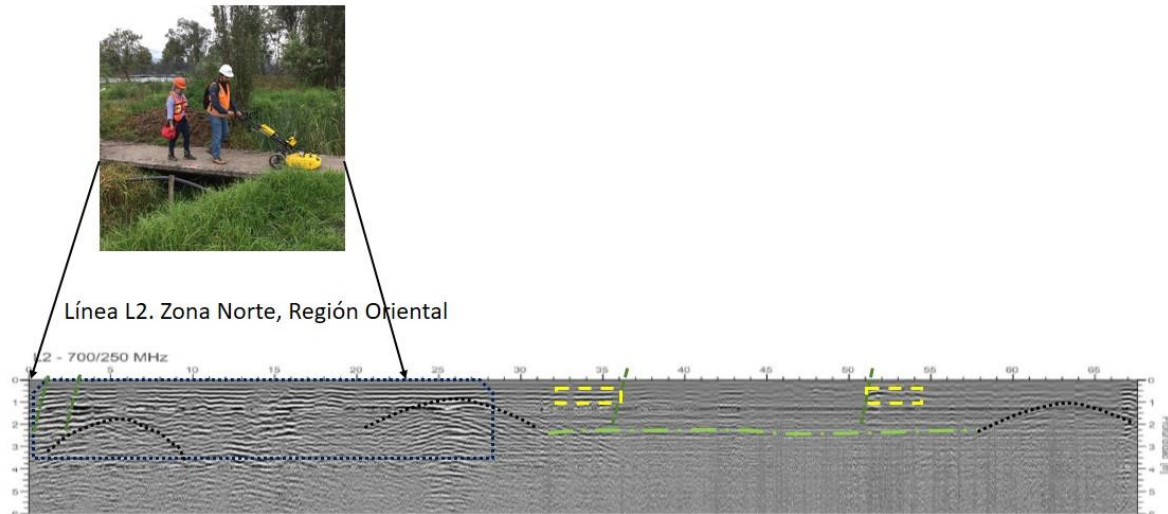
En el caso de la línea L1 (Figura # 3.8), esta tiene una longitud de 109 m y con desnivel total aproximado de 10 cm, distinguiéndose a profundidad 4 estructuras (hipérbolas), con separación entre cada uno de 34 m. Las tuberías están a una profundidad que varía de 1.10 a 1.20 m. No se documentó fracturamiento intenso en esta zona, por lo que el registro solo muestra patrones indicativos de tuberías poco dañadas. Aunque difícil de diferenciar, es probable exista un cambio en el grado de compactación del terreno a aproximadamente 3.20 m de profundidad.



**Figura # 3.8.** Línea L1 mostrando el radargrama de la zona sur de San Gregorio, Xochimilco.

Para el levantamiento de la línea L2 (paralela a L1), se decidió llevar a cabo este registro superficial dado el fracturamiento documentado en la región sur de San Gregorio, cerca de la zona de la Capilla. El puente de concreto define el elemento antropogénico principal, aunque existen dos secciones hiperbólicas en la parte oriental indicativas de tubería subterránea. Estas canalizaciones de riego muestran una separación de aproximadamente 36 m entre sí (Figura # 3.9). El mayor grado de fracturamiento (agrietamiento de 2-4 cm) en suelo o concreto se localiza al inicio de la línea, antes de iniciar el puente y queda expresado por trazas amplias documentadas en campo y plasmadas en el radargrama correspondiente.

La consecuencia de este agrietamiento puede corresponder a áreas porosas o semihuecas, razón por la cual se dan asentamientos del orden de centímetros en la base de la estructura. Estas zonas anómalas destacan por la atenuación que presenta la señal en las imágenes de radar y se resaltan con cuadros color amarillo, lo que se interpreta como una distribución más heterogénea de los materiales, asociados con menor contenido de sedimentos finos e incluso la presencia de porosidad y/o pequeñas grietas (Geotem, 2017).



**Figura # 3.9.** Línea L2 mostrando el radargrama de la zona norte de San Gregorio, Xochimilco.

Las líneas denotadas con la letra “R” son casi paralelas entre sí y con orientación preferencial NE 15° SW. El levantamiento con GPR de la zona se distribuyó en tres zonas de acuerdo con el grado e intensidad de fracturamiento registrado durante la primera etapa del estudio en la zona de San Gregorio (Figura # 3.7):

- a) Occidental con líneas R1 a R6,
- b) Central, con líneas R7 a R9 y,
- c) Oriental, con líneas R10 a R13.

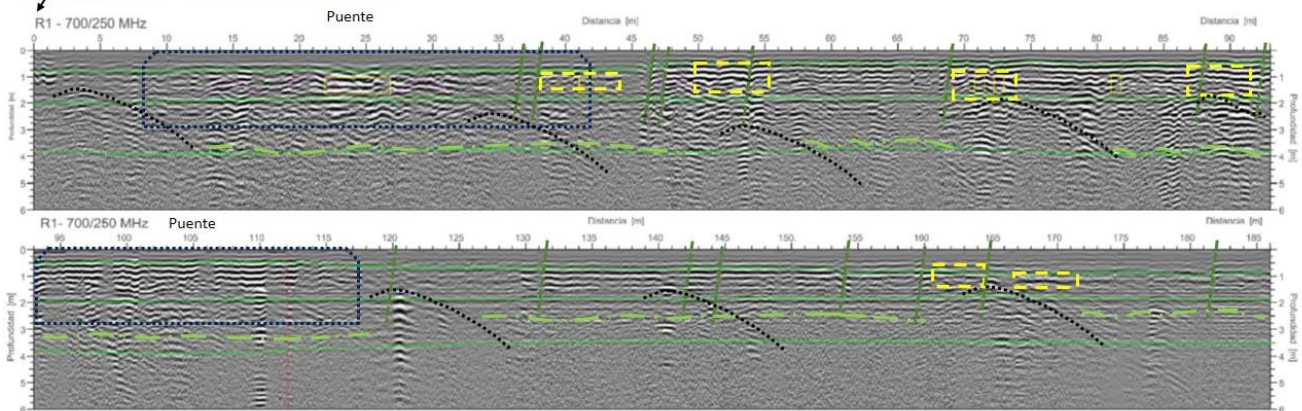
l) La **Zona Occidental** (líneas R1 a R6) muestra mayor grado e intensidad de fracturamiento, tanto del suelo como de los pasillos (aquellos que tenían recubrimiento de concreto).

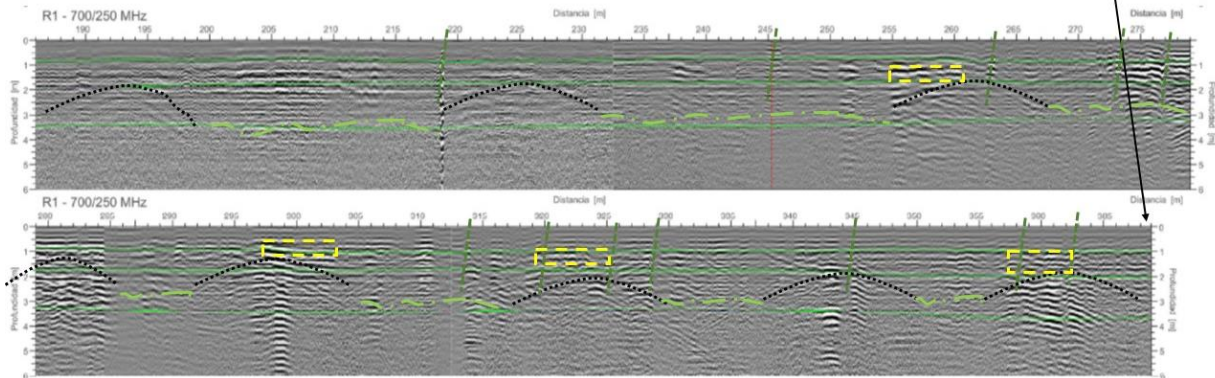
La línea R1 tiene una longitud de casi 310 m y muestra una serie de patrones semi-hiperbólicos geoméricamente distribuidos aproximadamente cada 18 m y a lo largo de la sección (Figura # 3.10). Con la excepción de los primeros 5 metros y a 95 m, que corresponden a la zona de influencia de puentes, las demás estructuras detectadas están a una profundidad que varía de 1.50 m hasta 2 m. El método no tiene la capacidad de

diferenciar estos elementos, aunque dada su distribución dan la noción de antiguos bordos de canalización, ahora completamente enterrados (Figura # 3.10). Existe una diferencia en el comportamiento de los materiales a profundidad, con un límite que varía desde los 2.70 a 3.6 m. Es precisamente donde existen estos elementos que se da mayor intensidad de agrietamiento, por lo que los recuadros amarillos indican zonas anómalas que pueden corresponder a menor contenido de material fino arcilloso y/o aumento de porosidad.

De acuerdo con versiones de pobladores de la zona, aquí es donde se tiene mayor grado de asentamiento. La distribución de estas semi-hipérbolas (185 a 309 m de la sección) es más espaciado hacia la zona norte de estudio, sin embargo, se encuentran más someros, con profundidades que están en el rango de 1.50 a 2.0 m y con zonas anómalas en sus cúpulas a una profundidad de 0.80 a 1.20 m.

Línea R1. Zona Occidental



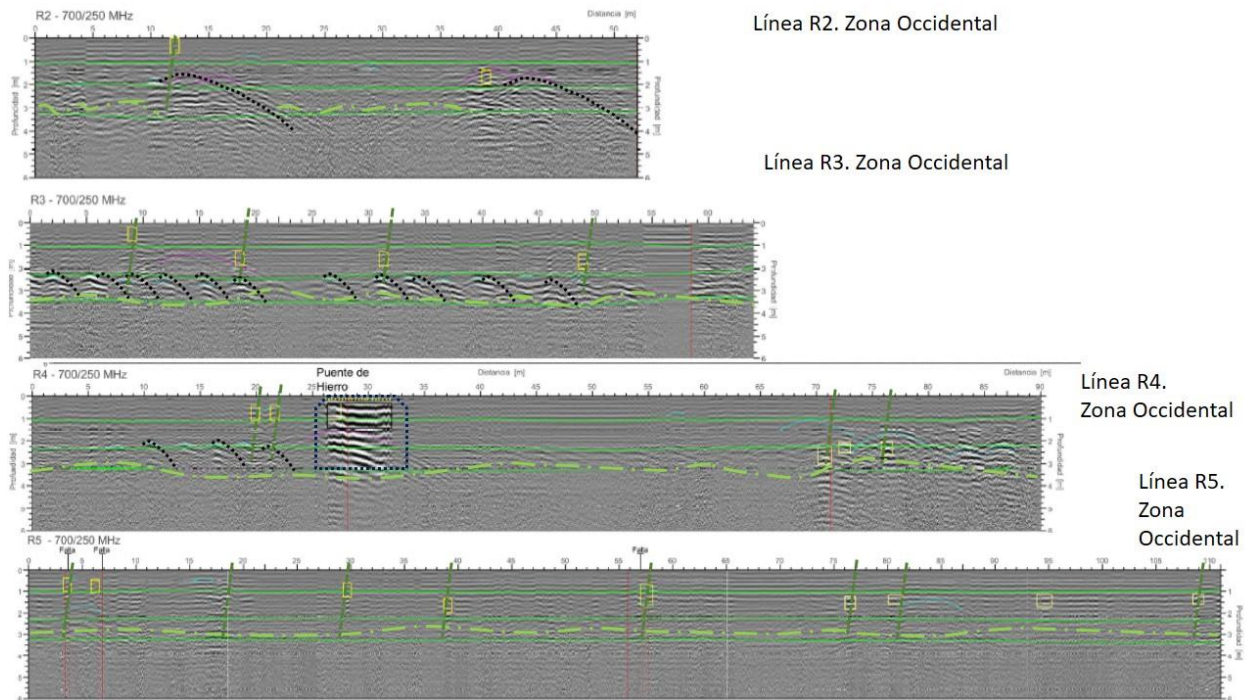


**Figura # 3.10.** Línea R1 mostrando el radargrama de la zona sur de San Gregorio, Xochimilco.

Las líneas R2, 3, 4 y 5 son paralelas entre sí y con separaciones en el rango de los 12 a los 20 metros (Figura 3.7). Los radargramas correspondientes muestran que las estructuras anteriormente descritas en R1 se repiten en R2, sin embargo, a partir de R3 hacia la zona norte, la distribución de los sedimentos, estructuras y los elementos anómalos es completamente distinta. Estructuras tipo rizadura a una profundidad de 3 metros y con separación casi equidistante de 5 metros entre ellas es evidente.

Las líneas colineales consecutivas R3 y R6, ambas, muestran estructuras rizadas siempre hacia la zona norte, en dirección a la denominada zona de la laguna. Aunque no se puede diferenciar a que específicamente corresponde esta respuesta, su arreglo parece asociado a antiguos sistemas de contención hídrica. Lo más importante de estas estructuras es que, por un lado, marcan el límite de un suelo de mayor compacidad hacia su base a una profundidad de 3.40 m y que, directamente arriba de ellas es frecuente encontrar agrietamientos y fracturas de hasta 5 cm de apertura con intervalos anómalos (recuadros amarillos) indicativos de

mayor porosidad y posibilidad de asentamiento (Figura # 3.11).



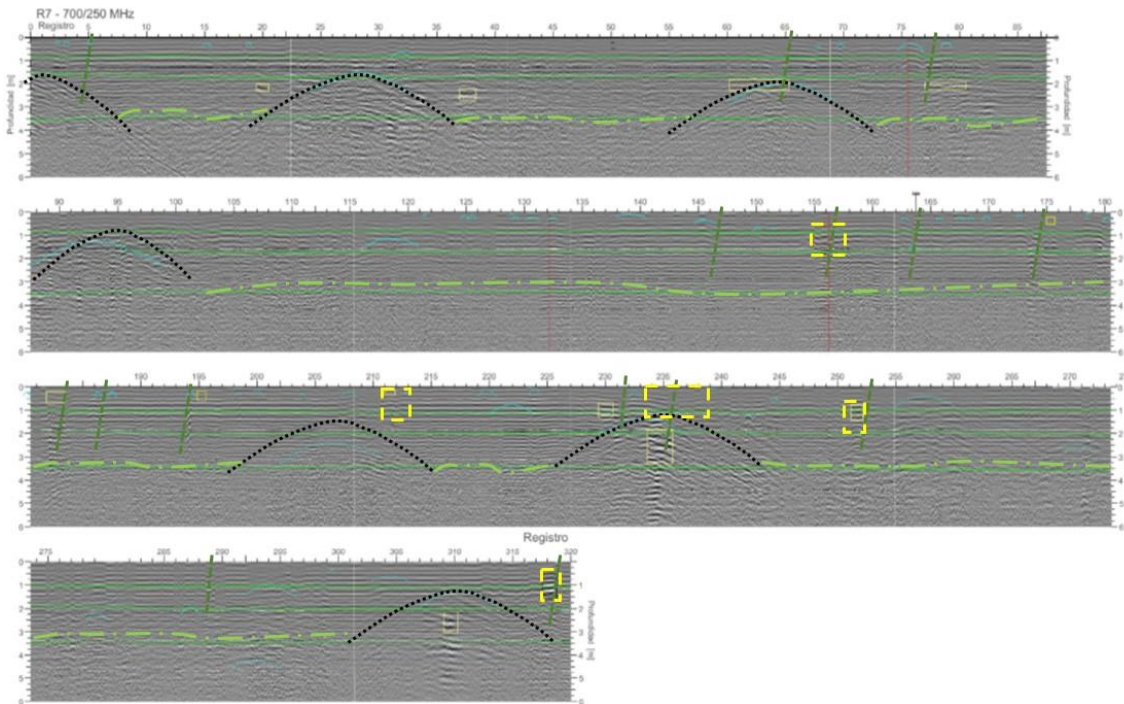
**Figura # 3.11.** Líneas R2 a R5 mostrando el radargrama compuesto de la zona sur de San Gregorio, Xochimilco.

II) La **Zona Central** (líneas R7 a R9) fue seleccionada debido a importantes problemas de asentamientos (hundimientos de hasta 20 cm) focalizados y perpendiculares a la sección longitudinal de la calle.

Al ser R7 una sección paralela a la red de distribución de agua para riego, las hipérbolas detectadas están distribuidas aleatoriamente y es posible representen conexiones propias de casas habitación a la tubería. En estas zonas es donde precisamente se detectaron mayores fracturamientos y asentamientos del terreno. El problema más evidente es la potencial ruptura de tubería (con el consecuente colapso del suelo) en el área más al norte de la línea (Figura # 3.12).



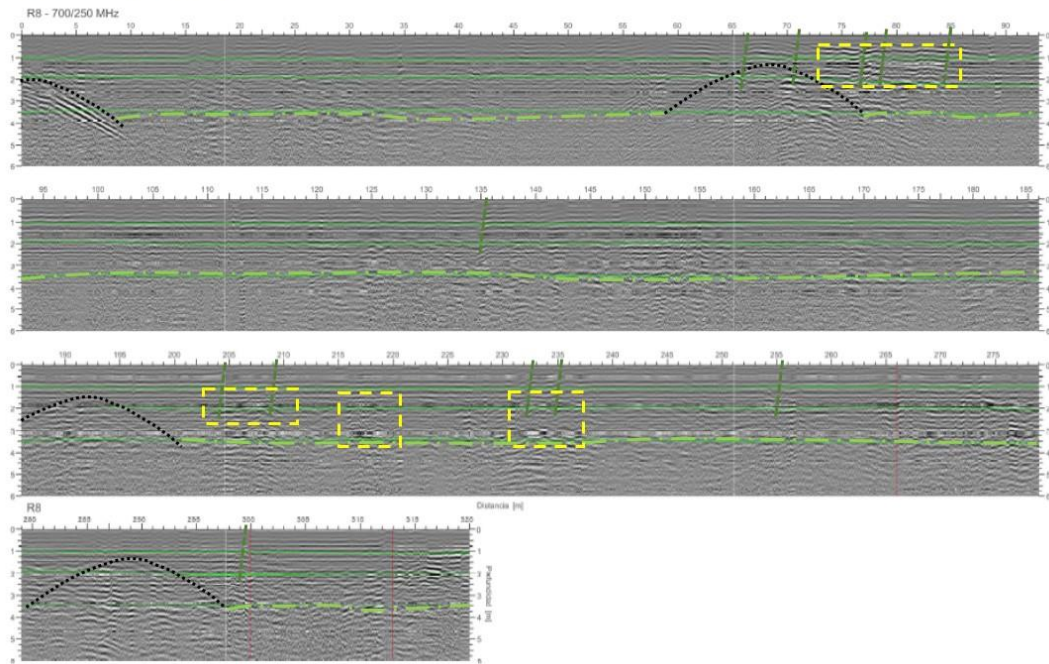
Línea R7. Zona Central



**Figura # 3.12.** Línea R7 mostrando el radargrama de la zona norte de San Gregorio, Xochimilco. Longitud total de 320 m.

La línea R8 es paralela a R7 y muestra también una distribución aleatoria de las hipérbolas, representando igualmente probables conexiones de toma de agua para invernaderos o, en todo caso tuberías de drenaje de casa habitación (Figura # 3.13). Aunque no se muestra intenso agrietamiento como en la sección anterior, existen zonas anómalas más profundas y de mayores dimensiones, algunas incluso con colapso, representando un riesgo para la población infantil (además de olores emanados) al quedar descubierta la sección rota de la tubería (Figura # 3.13 y 14).

Línea R8. Zona Central



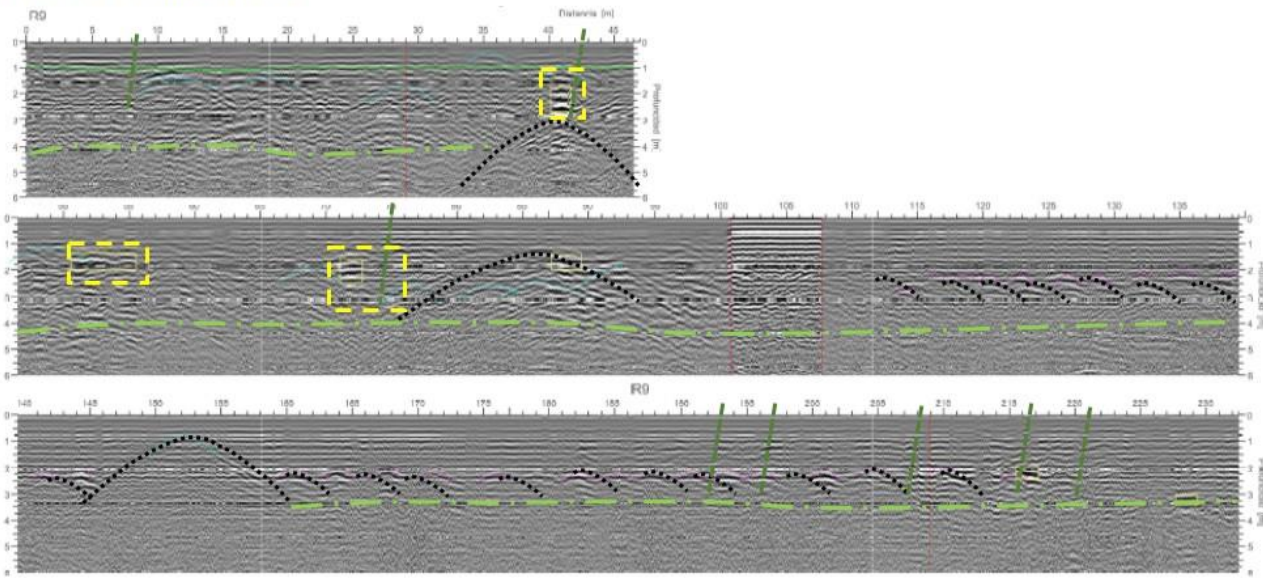
**Figura # 3.13.** Línea R8 mostrando el radargrama de la zona central de San Gregorio, Xochimilco. Longitud total de 320 m.

La línea 9 de levantamientos con GPR de la zona central de San Gregorio representa el área más septentrional (norte) de la zona de estudio. L9 es paralela a las líneas de la zona occidental R3, R4, R5 y R6.

La distribución de hipérbolas en esta zona (tuberías o canalizaciones) es también aleatoria, aunque mostrando una somerización hacia el norte, con profundidad de 3 m en el sur de la línea y de 1 m en el extremo norte. El patrón geométrico de rizaduras (también identificadas en R3) se repite, indicando que estos elementos antropogénicos profundos (canalizaciones o bordes antiguos) son longitudinalmente extensos. Es en esta zona donde mayores hundimientos diferenciales someros se presentan (Figura # 3.14).



### Línea R9. Zona Central



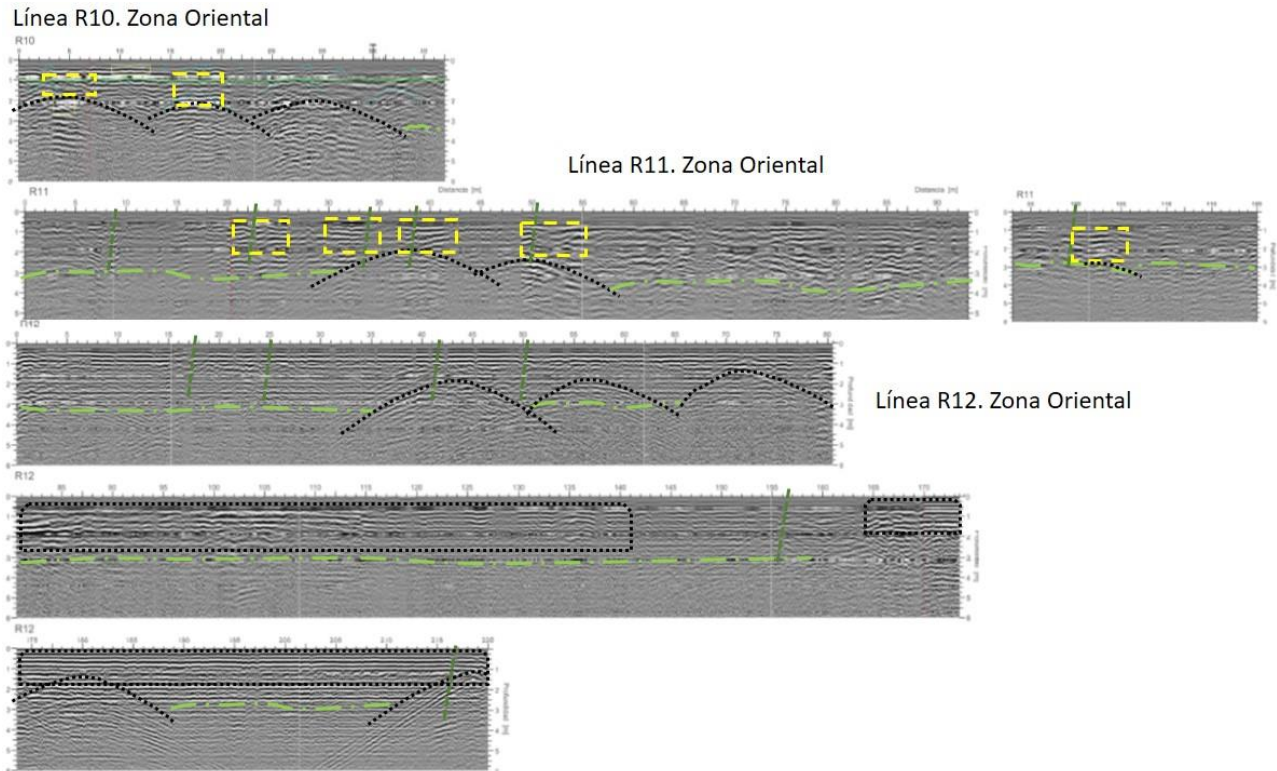
**Figura 3.14.** Línea R9 mostrando el radargrama de la zona central de San Gregorio, Xochimilco. Longitud total de 320 m.

III) **Zona Oriental** de San Gregorio. La sección de GPR está constituida por las líneas R10, 11, 12 y 13. El levantamiento se llevó a cabo de norte (R10, zona del lago) a sur (R13, Av. Belisario Domínguez) con el fin de detectar el mayor número de estructuras a profundidad (Figura # 3.15).

Nuevamente existe una distribución aleatoria de las hipérbolas con espaciado que va desde 11 m (R10) entre ellas hasta 30 m (R12). Los puentes y estructuras planares están bien definidos, particularmente en R12. La profundidad de enterramiento en este caso es muy variable, desde los 2 m (R10) hasta 2.50 m (R11) al igual que el ancho de las canalizaciones. La aglomeración en determinadas áreas (i.e.: R10 y R12 inicio e intermedio) pueden ser indicativos de bordos de contención y/o tuberías colineales antiguas. Verificación directa deberá ser considerada para definir a que corresponden las morfologías anómalas indicadas.

Caso contrario sucede en la parte final de R12, directamente en el pueblo y con asentamientos regulares donde las hipérbolas son indicativas de tuberías por debajo del

puente. Independientemente de la identidad de las estructuras, lo cierto es que aumenta el número de zonas con bajo contenido de arcillas y/o aumento del volumen poroso (Figura # 3.15). Estas zonas anómalas (recuadros amarillos) siempre están asociadas a fracturas y fallas y a profundidades de 50 cm. Aunque parte de estas regiones están encima de las hipérbolas, en algunos casos no muestran relación entre sí. En todo caso son zonas con potencial asentamiento.



**Figura # 3.15.** Líneas R10, 11 y 12 mostrando el radargrama compuesto de la zona oriental de San Gregorio, Xochimilco. Longitud total de 320 m.

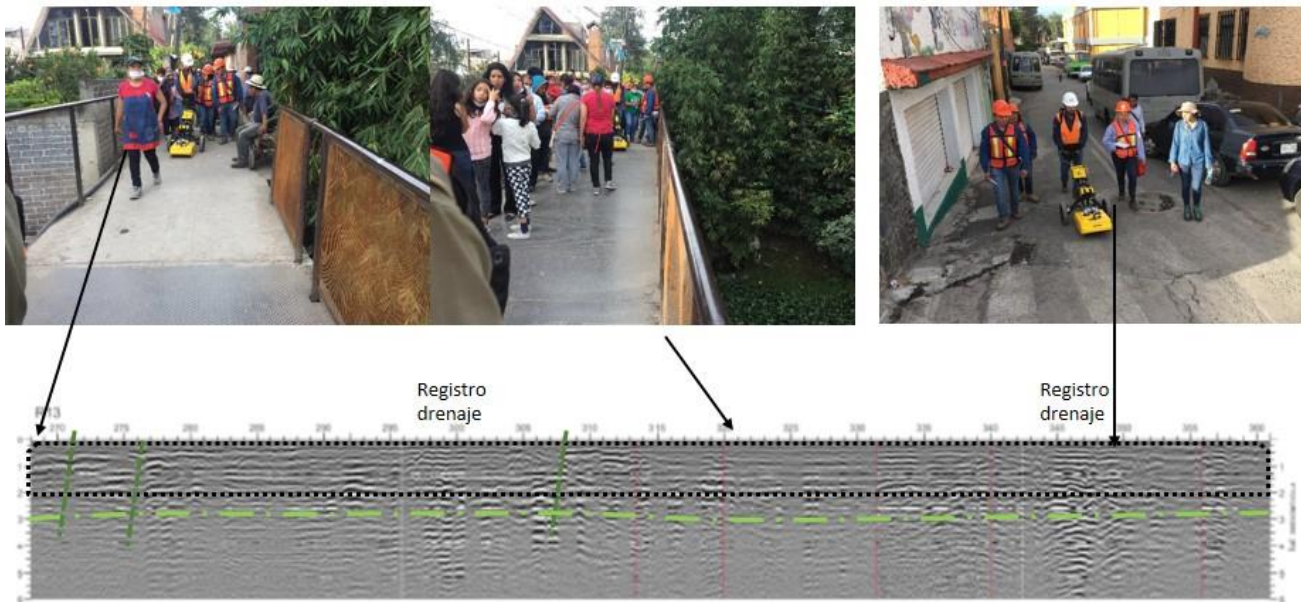
Casi la totalidad de la línea R13 está levantada sobre pavimento y donde el núcleo poblacional está bien desarrollado (Figura # 3.16), con casas contiguas y bardas que tendieron a fracturarse en el contacto entre ladrillo y castillo. Dadas y través fueron poco afectadas estructuralmente, no así paredes de casa habitación. Es importante correlacionar zonas anómalas respecto a edificaciones de dos pisos y con losas tradicionales de concreto.



En toda la zona estudiada las casas menos afectadas fueron las de un solo piso, particularmente aquellas cuya losa es de tipo ligero (unicel, mallado estructural y cemento).

Las fracturas que atraviesan por tubería de distribución de agua muestran mayor grado de afectación en la zona central. Los mayores asentamientos registrados corresponden a la zona occidental, en particular conforme están más cerca de la zona de lago. Donde las tuberías están fracturadas se presentan mayores zonas poco arcillosas y/o porosas, siendo de mayor atención incluso.

### Línea R13. Zona Oriental



**Figura # 3.16.** Línea R16 mostrando el radargrama de la zona oriental de San Gregorio, Xochimilco. Longitud total de 361 m.

## 3.4 APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA CON DRONE

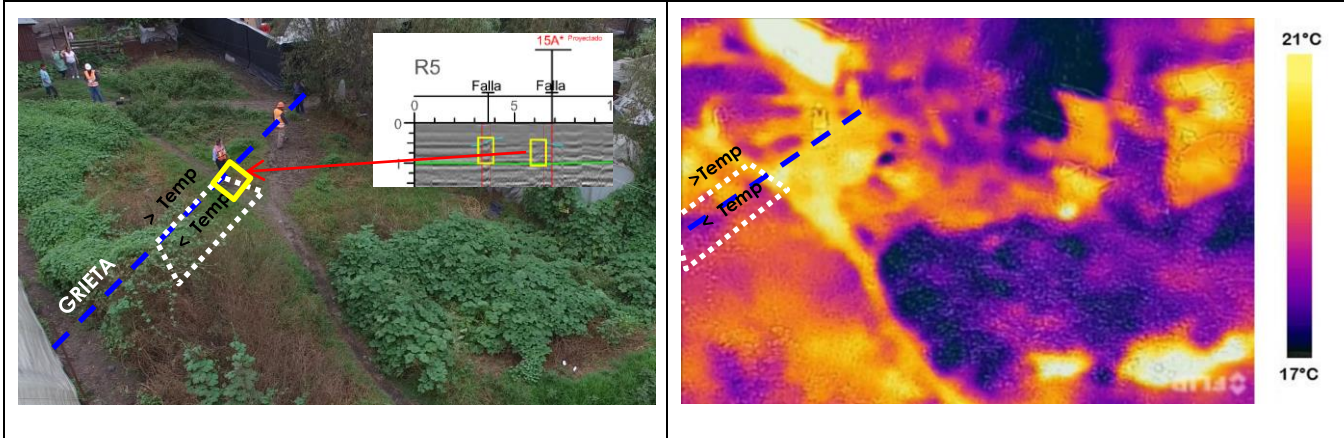
La termografía tiene como fuente primaria la radiación infrarroja (el calor) que emiten los objetos. Todos los objetos con temperatura superior al cero absoluto (-273,15 °C, ó 0 grados Kelvin), irradian ondas en la banda infrarroja del espectro de radiación electromagnética. Incluso los objetos considerados muy fríos —por ejemplo, un trozo de hielo— emiten una

radiación infrarroja característica. Es esta propiedad de cada objeto la que permite utilizar cámaras con sensores de detección integrados y es útil particularmente para objetos móviles, en funcionamiento y de difícil acceso.

El método es indirecto, no invasivo ni destructivo y de fácil adquisición, lo que permite la interpretación de fenómenos transitorios con base en las diferencias o contrastes de temperatura que presentan los objetos y superficies. El método no requiere contacto físico para su medición ni suspensión de actividades para aplicarlo. Se basa en la interpretación de las temperaturas superficiales.

En el caso de las grietas, con la termografía se buscaron los contrastes laterales de temperatura, pero eliminando todos los elementos antropogénicos no asociados a dicho efecto. La aplicación de método no resultó convincente totalmente, aunque se detectó que las zonas con mayor temperatura (en tonos de amarillo a blanco) pueden ser asociadas con nivel alto del asentamiento y, por el contrario, los tonos violetas que registran bajas temperaturas, se pueden asociar con la parte baja de la grieta o el suelo recientemente expuesto. Un efecto similar se evidencia en caminos transitados de terracería y con poca vegetación que atraviesan las zonas térmicas (color morado) de los invernaderos y áreas cubiertas con pasto.

En la figura #3.17 se aprecian un par de imágenes con en la región norponiente afectada del Barrio de San Gregorio, Xochimilco: a la izquierda el espectro visible y la derecha región térmica. En la imagen térmica se registra un sutil contraste lateral de una grieta superficial y la cual fue verificada en campo, por medición directa (desplazamiento vertical de 15 cm). De esta forma, aunque se aprecia el efecto buscado, el criterio aplicado no permitió verazmente identificar agrietamientos.



**Figura # 3.17.** En las imágenes se destacan una anomalía primaria, con una línea en color blanco **Izquierda.** - Vistas del espectro visible. **Derecha.** - Imagen de termografía, que asocia bajas temperaturas a tonos fríos (púrpura) y mayores temperaturas en tonos amarillos.

## COLABORADORES ESTUDIANTILES:

Hernández Sánchez Esther, Joel Enrique López A., María del Rosario López García, Jessica Moreno Maldonado, Silvia Pilar Pérez Tovar, Araceli Pérez Santiago, Sandra Elia Salinas Martínez, Itanahui Romano Vázquez, Olivia Dianara Pita Sllim.



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.1 CONCLUSIONES

Se evaluaron las condiciones del terreno e infraestructura exterior de construcciones periféricas en la zona de San Gregorio, Del., Xochimilco que resultaron dañadas a causa del sismo ocurrido el día martes 19 de septiembre de 2017, a las 13:14 hrs.

El trabajo de campo e informe involucro GEOTEM Ingeniería y un grupo de estudiantes voluntarios de la UNAM y del IPN. Las acciones y actividades realizadas respondieron a la solicitud del grupo de Protección Civil (PC) de la Del. Xochimilco y consistieron en:

- **Recopilación** de documentación inicial
- **Evaluación** de mapas de datos magnéticos y gravimétricos de la zona
- **Levantamiento** estructural
- Aplicación del método de **georadar de penetración terrestre (GPR)**

Se definieron tres sistemas recientes de fracturamiento consecuencia del sismo con rumbos (dirección) preferenciales:

- A) Sistema E-W: **Rumbo** de fracturamiento **NW 75 a 85° SE**, **inclinación** dominante al NW de **70° a 82°**, **ancho** promedio de **fracturas** de **2 a 8 cm** y **profundidad** de fracturas de **8 a 56 cm**. Este grupo de fracturas es **paralelo** a la **Falla Regional Xochimilco-Xicomulco**.
- B) Sistema NS: **Rumbo** de fracturamiento **NE 15 a 23° SW**, **inclinación vertical**, **ancho** promedio de **fracturas** de **0.5 a 7 cm** y rango de **profundidad** de fracturas de **3 a 18 cm**.
- C) Sistema NW: **Rumbo** de fracturamiento **NW 10 a 15° SE**, con **inclinación vertical**, **ancho** promedio de fracturas de **8 cm** y rango de **profundidad** de fracturas de **15 a 27 cm**. Este grupo de fracturas es **subparalelo** a la **Falla Regional Mixhuca**, que esta oculta en la zona del lago, representando la **traza** del sistema hacia el **sureste** y cuya terminación ocurre en la zona de San Gregorio.

Los sistemas A y C son casi ortogonales, generando una mayor afectación donde tienden a converger dañando más sensiblemente las construcciones ubicadas en la zona del embarcadero.

El **fracturamiento** asociado al sistema C) Rumbo de **NW 10 a 15° SE**, aunque no es abundante, está presente como grupos de agrietamientos orientados tanto **en casas**

**habitación, en concreto de pasillos e incluso en suelo de uso agrícola**, principalmente en la **región norte** de San Gregorio.

Los **Sistemas de Fallas E-W Xochimilco y Xicomulco** se compone de varias estructuras paralelas cuya traza es más sutil hacia la zona del lago y **generan en su conjunto un basculamiento general del terreno hacia el norte**. Los **cantiles** asociados a estas fallas están **ocupadas por casas habitación** y están **ubicadas en las zonas de mayor riesgo**. La continuidad y distribución de estas estructuras geológicas en el subsuelo deberán tomarse en cuenta para delimitar zonas más susceptibles y para **planificar estratégicamente el futuro desarrollo urbano/inmobiliario** (base de cimentaciones, profundidad adecuada en líneas de drenaje dada la modificación del uso de suelo (de agrario a urbano en crecimiento progresivo)).

Los distintos tipos de roca volcánica a profundidad y el paquete de sedimentos granulares someros (suelo blando, saturado) ocasiono que la **amplitud** como **duración** del fenómeno **telúrico** fuera mayor (UNAM-SSN, 2017). Eso afecto principalmente a los núcleos urbanos establecidos **en la zona de transición litológica** (limite zona ex-lacustre), principalmente a **estructuras bajas, de más de dos niveles con losas pesadas de concreto.. Casas con losas mixtas concreto-unicel tuvieron mínima afectación estructural**.

Los **mapas geofísicos** (Magnéticos, Gravimétricos, Derivada Tilt y Señal Analítica) de la zona de estudio, permitieron **corroborar** la **continuidad** de los sistemas de las **fallas** regionales en la zona de San Gregorio. De estos mapas es aún **más importante** resaltar que la delgada franja E-W que ha sido catalogada como zona geotectónica de transición III debe ser redefinida, ampliando su extensión tanto hacia el norte franco como al sur (Figura #4.1). Se requieren otros tipos de estudios para comprobar el limite subterráneo (Figura # 2.4) y engrosamiento de los depósitos sedimentarios detríticos (valores menores a -200 nT) así como profundidad de contacto con materiales volcánicos más competentes (sur de San

Gregorio).

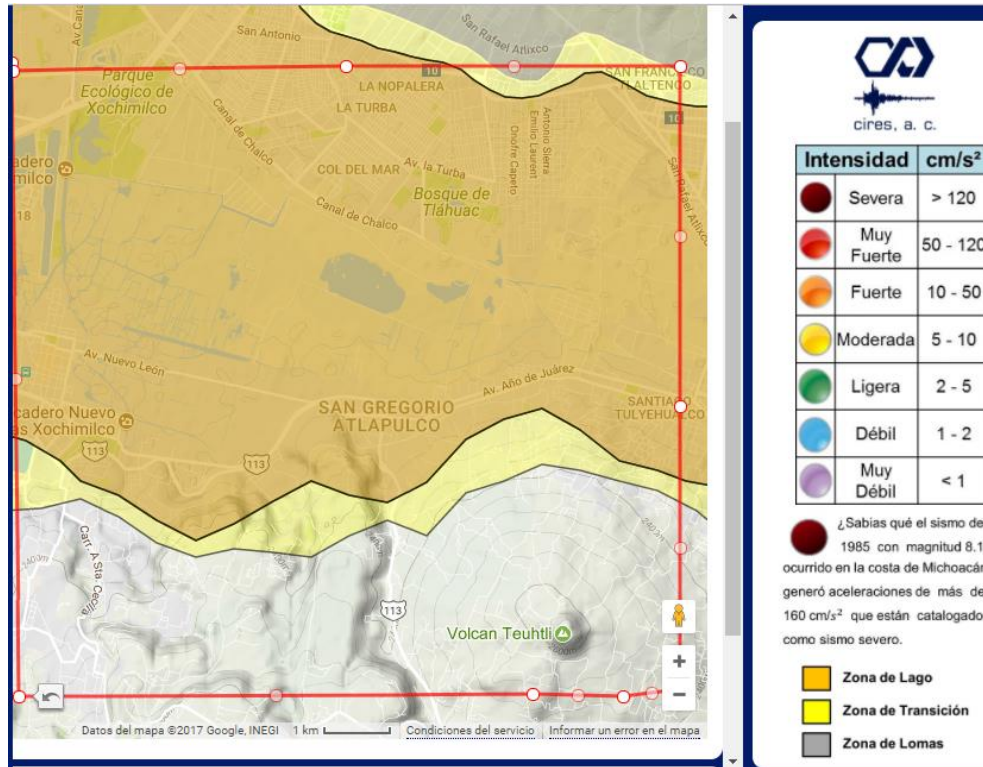


Figura # 4.1. Mapa de la red acelerográfica CIRES de la Ciudad de México mostrando la zona de estudio. El límite norte de la franja amarilla (zona de transición), con intensidades de aceleración de 5 a 10 cm/s<sup>2</sup>, debe ser extendido hasta la Av. Año de Juárez. Es probable, de acuerdo con datos de campo, que la traza sur de la Falla Mixhuca se extienda hasta la margen occidental del Volcán Teuhtli. (Fuente: [http://cires.mx/racm\\_mapa/index.php](http://cires.mx/racm_mapa/index.php))

Los cambios observados y efectos interpretados en radarogramas obtenidos por GPR permitieron:

- ❖ Identificar la presencia y distribución de elementos antropogénicos subterráneos en la zona de estudio afectada. Los resultados detallados de esta interpretación se presentan en el Anexo 1.
- ❖ Algunas tuberías orientadas N 10° E utilizadas para distribución de aguas de riego fueron afectadas por el sistema de fracturamiento C), NW 10 a 15° SE, rompiéndose



e incluso generando socavones someros, particularmente en la zona noroeste del Barrio de San Gregorio.

- ❖ La identificación y ubicación de estructuras con GPR en la zona de estudio deberá ser considerado como método de prevención y evitar futuros riesgos en el sitio.
- ❖ La línea L1 (Figura # 3.8), tiene un desnivel total aproximado de 10 cm, distinguiéndose a profundidad 4 estructuras (hipérbolas), con separación entre cada uno de 34 m. Las tuberías están a una profundidad que varía de 1.10 a 1.20 m. Es probable exista un cambio en el grado de compactación del terreno a aproximadamente 3.20 m de profundidad.
- ❖ Las líneas R7 a R9 de la Zona Central del Barrio de San Gregorio tiene importantes problemas de asentamiento (hundimientos de hasta 20 cm) focalizados y perpendiculares a la sección longitudinal de la calle. Es probable que grado de asentamiento y ruptura de tuberías menores (requiere verificación) estén asociadas a conexiones propias de casas habitación a la tubería de red de abastecimiento principal. Esto se identificó también en la Línea R8, donde existen zonas anómalas más profundas y de mayores dimensiones, algunas con colapso, representando un riesgo para la población infantil (además de olores emanados) al quedar descubierta la sección rota de la tubería (Figura 3.14).

## 4.2 RECOMENDACIONES

- a) Continuar con los **trabajos de levantamiento estructural**, principalmente hacia la zona de Nativitas y en la zona de cantiles asociados al sistema de fallas Xochimilco-Xicomulco. En caso necesario habrá que considerar esta zona como de riesgo alto.
- b) Realizar una campaña con **levantamiento de Gravimetría**, para definir con mejor detalle la posible franja de riesgo por estos sistemas de fallas. Es necesario enfocarse en la zona del lago para determinar la traza de las estructuras geológicas.
- c) Considerando el entorno hídrico de la región y fracturamiento puede ser conveniente llevar a cabo una campaña con **tomografía de resistividad eléctrica** para monitorear el

patrón de flujo de agua y/o abatimiento de niveles freáticos locales.

d) **Seguir** las NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO y las NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO. En caso de existir, la segunda losa debe considerar materiales compuestos que resten peso a estructuras de casa habitación, así como dalas y través amarradas correctamente a sitios de soporte de cargas.

e) Es necesario contar con un plan de contingencia para abastecimiento de agua y delimitar una franja de amortiguamiento exclusivamente de uso agrícola a lo largo de áreas que puedan ser afectadas, por la continuidad de trazas geológicas.



## BIBLIOGRAFIA

---

- Berenger, J. P., "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J. Computational Phys. 114, 185-200, 1994.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O.A., Holliger, K., 1998. Finite difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media. Geophysics 63 (3), 856-867.
- R. J. Puskas, "A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar," Geophysics, vol. 41, no. 3, pp. 506-518, June 1976.
- Davis J.L. and A.P. Annan, 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, 37: 531-551.
- Eyuboglu S., Mahdi H., Al-Shukri A. (2004): Detection of water leaks using Ground Penetrating Radar. Department of Applied Science University of Arkansas at Little Rock, AR, 72204, U.S.A.
- Kretzschmar, J.L., Kibbe, K.L., and Witterholt, E.J.: "Tomographic reconstruction techniques for reservoir monitoring". Report 10990, Soc. Petrol. Eng., 1982, pp. 1-11.
- Lau, Chun Lok, Tom Scullion y Paul Chan, 1992(b). Using ground penetrating radar technologies for pavement evaluations in Texas, U.S.A., 1992. IV Int. Conf. on GPR. Geological Survey of Finland, special paper 16. Pgs. 277-283.

## CERTIFICACIÓN

El presente reporte fue realizado de acuerdo con los procesos internos de la empresa documentados en su certificación **ISO9001:2008** con número de certificado **MX15/968345**, para las actividades de **“Servicios de consultoría en exploración del subsuelo mediante técnicas no invasivas o indirectas”**.

En espera de haber cumplido con los objetivos propuestos, ponemos a su consideración el presente trabajo y a la vez en disponibilidad de aclarar dudas al respecto.



**ING. CARLOS PITA DE LA PAZ**  
**DIRECTOR GENERAL**

**ING. MARCO A. RUBIO R.**  
**GERENTE DE PROYECTOS ESTRATEGICOS**

## ANEXO DE FIGURAS

---

- Figura SG-1** Localización del Área de Estudio
- Figura SG-2** Localización del Área de Estudio en imagen de satélite
- Figura SG-3** Localización de la zona de estudio
- Figura SG-4** Localización de la zona de estudio en imagen de satélite
- Figura SG-5** Localización de la zona de estudio en mapa Geológico (SGM)
- Figura SG-6** Mapa de Campo Magnético Total
- Figura SG-7** Mapa Magnético de Reducción al Polo
- Figura SG-8** Mapa Magnético de Derivada Tilt
- Figura SG-9** Mapa Magnético de Señal Analítica
- Figura SG-10** Mapa Gravimétricos de Anomalía de Bouguer y mapa residual de Bouguer
- Figura SG-11** Localización de Exploración Geofísica por Georadar
- Figura SG-12** Localización de Exploración Geofísica en imagen de satélite con asentamientos