



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

Universidad Nacional Autónoma  
de México

---

Facultad de Ingeniería

Caracterización de Rasgos Superficiales para Determinación  
de Riesgo por Subsistencia a Partir de Datos de  
Conductividad Electromagnética

TESIS

que para obtener el grado de

Ingeniero Geofísico

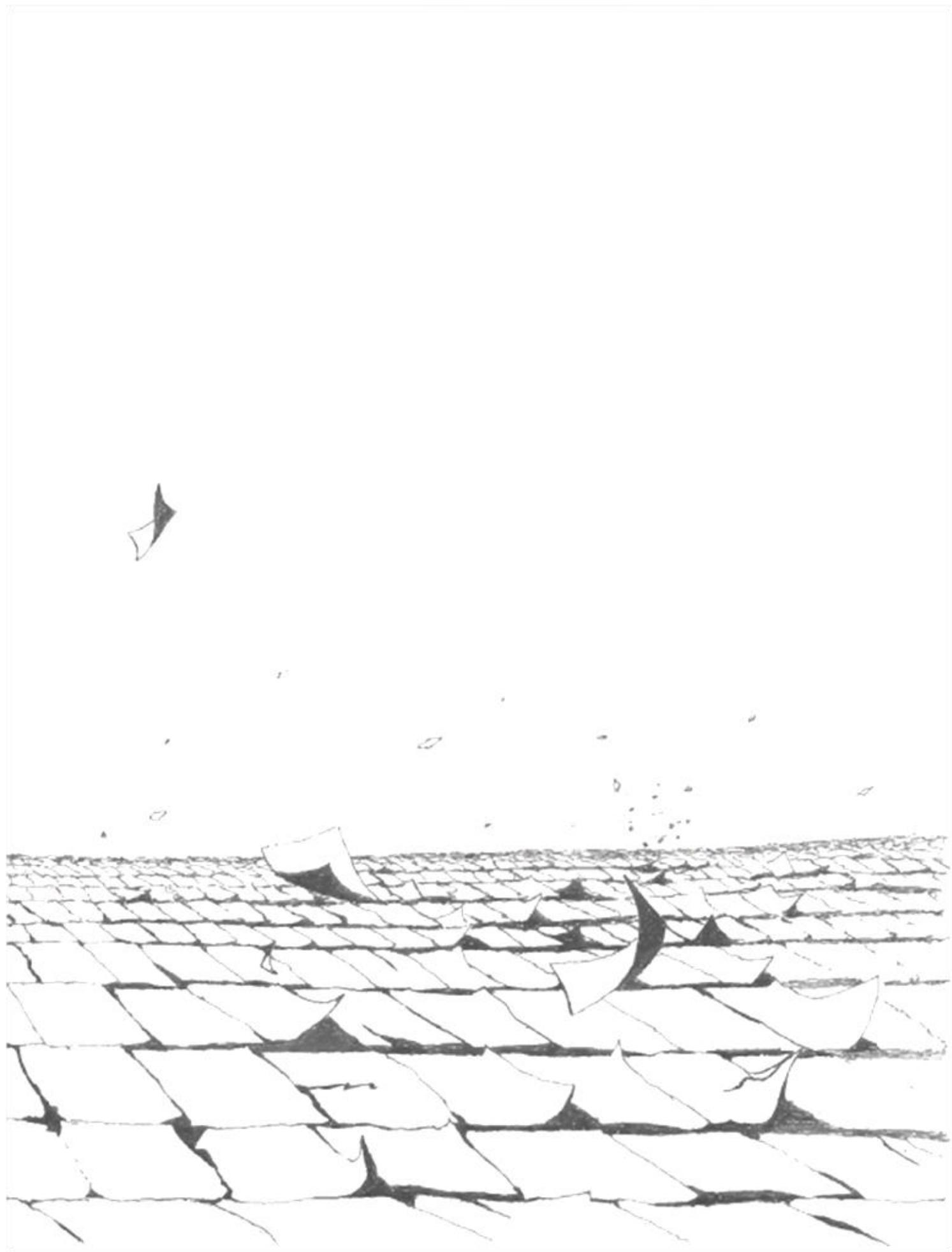
presenta

Gonzalo David Sansón Vera

Tutora: Claudia Arango Galván

C.U., México. 2013.





## **AGRADECIMIENTOS**

A mi amadísima Universidad Nacional Autónoma de México y el aire antaño que en ella se respira; su belleza incomparable patrimonio de la humanidad cuyos espacios, museos, facultades, teatros, bibliotecas y áreas verdes se nutren de los murales y ensueños de los idealistas mexicanos que vislumbraron una nación comprometida con el progreso profundo, esa estado extraño entre lo material y espiritual, las ciencias y las humanidades.

Agradecimientos especiales a la doctora Claudia Arango Galván. Gracias por ser mi tutora y por la paciencia y todas esas tardes de consejos y correcciones, gracias por compartirme ese universo tuyo de conocimientos académicos y personales. Por el interés y exigencia por un buen trabajo. Por hacerme ver mis errores. De verdad no es poco cómo valoro el tiempo que hemos trabajado juntos y todo lo que he aprendido. Gracias por enseñarme.

Así también al profesor y amigo Alejandro Arroyo Carrasco por su enseñanza y apoyo, su honestidad es digna de la más sincera admiración. El poco tiempo que he compartido junto a usted como estudiante o profesional ha sido enriquecedor; es un profesor que despertó en mí la motivación y júbilo de entregarse al trabajo.

Gracias al Programa Nacional de Becas para la Educación Superior (PRONABES-UNAM) y al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM por el proyecto de clave IA100812 y título “Caracterización geofísica de una porción del acuífero de la Cuenca de México en la zona de Ciudad Universitaria”. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Al Instituto de Geofísica de la UNAM por brindarme el espacio y las facilidades para elaborar la tesis y servicio social.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal por su apoyo y colaboración con la UNAM en el desarrollo de proyectos científicos para el desarrollo y bienestar de los ciudadanos.

Gracias también a las autoridades de Protección Civil de la Delegación Milpa Alta por su trabajo, atención y apoyo en la elaboración de este trabajo.

A mi buen amigo José Luis Salas por apoyarme durante la elaboración de esta tesis, no sólo con la adquisición en campo sino en todas las dudas que resolvimos y platicamos que compartimos en ese cubículo que encerrará los ecos de risas e historias contadas.

Por último a mi México mágico, su gente, su comida, su flora y su fauna, su calor y su frío, su ancestral sabiduría que levita entre el electromagnetismo histórico de esta tierra, a sus voluntades naturales que se mantienen escondidas a los ojos tristes del hombre perdido y colonizado por la modernidad. A la inmensidad de la lluvia, viento y fuego, el sol y la luna, sus montañas, selvas y desiertos y a la muerte mística que cobija a la vida cuando ésta está muy vieja para moverse.

## DEDICATORIA

No existen palabras en nuestro lenguaje cotidiano que tengan la fuerza suficiente para quebrantar el delicado muro de la piel, traspasar la ternura de nuestra carne brava e incidir sobre el órgano escondido que resguarda celosamente nuestras emociones. A pesar de ello, viendo con desdén la fatalidad que espera por el final de mis ingenuas intenciones, rescataré del circo que es la palabra escrita ese sentimiento inefable que se encuentra diluido entre la tinta impresa sobre las siguientes hojas y aquella que mancha los párpados cual cicatrices del tiempo que dejan atrás las tareas, exámenes y trabajos finales como huellas abandonadas sobre desierto a merced del viento. Así fue. Así es. Al final de cuentas, detenerse y contemplar esos rastros en la arena del camino andado.

Parado en esa tierra intangible de frente al horizonte que miraba directo a mi espalda durante el andar de estos años, me es inevitable no pensar en el origen. En aquel humilde hogar que está ahí desde mucho antes que se forjará el primer recuerdo articulado en mi memoria y que terminaría empacando, en la complicidad del silencio, dentro de la misma mochila junto con los cuadernos y la pluma, la brújula, la pica, ropa, dinero, consejos y recomendaciones, tantos regañones como abrazos, preocupaciones, historias que nacieron de palabras viejas y palabras que murieron en historias mudas. En mi familia, extensión de mi cuerpo inmaterial. Mi padre y esos momentos en los cuales me transmite las anécdotas de su pasado; su responsabilidad y generosidad que, a pesar de equivocadamente pocas veces decirlo, tomo como ejemplo de ese hombre trabajador que admiro. Mi madre y esas tardes de largas pláticas de análisis y confesiones, que resaltaban la perspicacia de una mujer inteligente que ha intentado inculcar en sus hijos el deseo de anhelar siempre algo más que el mundo inmediato que nos rodea. Mi hermana, eterna géminis, mi otra carne producto de esas fuerzas duales que rigen el mundo; tan distintos uno del otro pero umbilicalmente conectados en algunos momentos que sólo a los que nacen acompañados les es familiar. Gracias por no dejar nunca separarme de la pureza de la infancia. Siempre estaré ahí para ti hermana. Envejeceremos siendo niños.

Y a las personas que también conocí en la universidad y de las cuales aprendí cada vez que dejaban llamarse amigos. En especial a mi amiga Yesenia, con la cual he vinculado ya una hermandad a causa de todas esas noches de desvelo programando o estudiando, esas tardes de biblioteca, exposiciones; mañanas de inscripción, fiestas y esos viajes observando el paisaje de una carretera mexicana escuchando música. Gracias por dejarme conocer tu casa, ese lugar mágico entre la neblina y el río que baja por la montaña. A mis amigos Vences y Taxi por compartir siempre pláticas y momentos tan interesantes de historia, libros, música y más. A mi carnalito Pablo por todos esos ratos de aventura y los que faltan. Y a todos ellos que por falta de espacio ausento pero que siempre extenderé la mano.

Ahora, a seguir caminando.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	13
2.1 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA. ECUACIONES DE MAXWELL. ....	13
2.2 PRINCIPIOS DEL MÉTODO FDEM .....	15
3. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	24
3.1 GEOGRAFÍA FÍSICA.....	24
3.2 HIDROESTRATIGRAFÍA .....	25
3.3 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO .....	26
3.4 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO .....	28
4. IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO .....	32
5. PROCESADO DE DATOS E INTERPRETACIÓN.....	36
6. CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2 Rango de frecuencias y de profundidad efectiva para valores típicos de resistividad de algunos métodos electromagnéticos (Pellerin y Wannamaker, 2005). .....	16
Figura 2.3 Principales tipos de arreglos entre bobinas (Milsom, 2003). .....	17
Figura 2.4 Diagrama representativo del acoplamiento entre los campos, homólogo de un circuito de 3 espiras (Simpson, 2009). .....	18
Figura 2.5 Función de respuesta de un sistema horizontal de bobinas para medios de distintas resistividades y frecuencia fija en función del parámetro de respuesta (Milsom, 2003). .....	19
Figura 2.6 Variación de la conductividad aparente con la separación entre bobinas en tres distancias diferentes (a, b, c) y el Número de Inducción correspondiente (d) para los arreglos coplanar horizontal (HCP), coplanar vertical (VCP) y perpendicular (PERP) (Beamish, 2011). .....	23
Figura 2.7 Variaciones de la conductividad aparente en función de la altura del instrumento para los arreglos coplanar horizontal (HCP), coplanar vertical (VCP) y perpendicular (PERP) (Beamish, 2011). .....	23
Figura 3.1 Mapa topográfico de la Cuenca de México (GDF-SMA, 2002). .....	24
Figura 3.2 Mapa geológico del área de estudio. San Antonio Tecómitl, Milpa Alta. Rosetas de rumbo para esfuerzos compresivos P (izquierda) y esfuerzos cortantes T (derecha) (Mora-Chaparro, 2011). .....	27
Figura 3.3 Esquema de esfuerzos (Pacheco-Martínez, 2007). .....	30
Figura 3.4 Mapa hipsométrico del área de estudio. San Antonio Tecómitl, Milpa Alta (Mora-Chaparro, 2011). .....	31
Figura 4.1 Zona de estudio. Deportivo Tecómitl, San Antonio Tecómitl, delegación Milpa Alta. ....	32
Figura 4.2 Trabajo en campo, Noviembre 2012. ....	35
Figura 5.1 Componente en fase para la configuración CMD-2 (partes por miles). Prof. Exploración 3m. ....	39
Figura 5.2 Componente en fase para la configuración CMD-4 (partes por miles). Prof. Exploración 6m. ....	39
Figura 5.3 Resistividad aparente para la configuración CMD-2 (ohm·m). Prof. Exploración 3m. ....	42
Figura 5.4 Resistividad aparente para la configuración CMD-4 (ohm·m). Prof. Exploración 6m. ....	42
Figura 5.5 Función de sensibilidad $\phi(Z)$ y función acumulativa $R(Z)$ de los arreglos coplanares vertical y horizontal (Milsom, 2003). .....	46

## **RESUMEN**

La demanda del recurso hídrico para el abasto de grandes ciudades asentadas sobre las cuencas lacustres, como es el caso de la Ciudad de México, es la principal causa de la extracción del agua subterránea y con ello al desarrollo inherente de las variadas problemáticas entorno a esta práctica, tales como la subsidencia diferencial y el desarrollo de grietas, entre otras.

Los métodos geofísicos, como conjunto de técnicas para el estudio del subsuelo, muestran su importancia toda vez que son capaces de proporcionar información que ayude a la conceptualización e interpretación de las variables que intervienen en los problemas anteriores y faciliten su resolución.

La zona de estudio abarca una unidad deportiva del poblado de San Antonio Tecómitl de la delegación Milpa Alta, ubicada al sureste del Distrito Federal, que se caracteriza por ser zona de transición entre los sedimentos lacustres y aluviales del Cuaternario y las rocas ígneas extrusivas de la Formación Chichinautzin.

Se implementó el método electromagnético en el dominio de la frecuencia con ayuda de un equipo de inducción electromagnética a una distancia entre bobinas de 1.89 y 3.77 metros (CMD-2 y CMD-4 respectivamente).

El sistema de inducción electromagnética se operó para caracterizar los patrones superficiales de las propiedades eléctricas del terreno a dos profundidades distintas de investigación e inferir así zonas susceptibles de formación de nuevas grietas.

La interpretación es posible a través de la visualización directa en planta de los datos calculados a partir de las componentes del campo electromagnético observado.

Se identificó previamente una grieta recurrente en temporada de lluvias que debe su origen a procesos de tubificación principalmente, en combinación con la deformación que se presenta en el área de investigación debido al hundimiento del terreno.

## **ABSTRACT**

The demand of water resource for big cities supplying laying on lacustrine basins, as the case of Mexico City, is the principal cause of ground water withdrawal and entails to the development of its inherent problematic produced by this practice such as differential subsidence and cracking, so others.

The geophysics methods, as a technical joint for subsoil studying, show their importance every time they are capable to give some information that helps out with the conceptualization and interpretation of the variables that are involved in the last mention problems and makes easier their resolution.

The study area covers a sportive unit in San Antonio Tecómitl, Milpa Alta, in the southeastern portion of Distrito Federal, and is characterized for being a transition zone between alluvial and lacustrine sediments of Cuaternary and extrusive igneous rocks of the Chichinautzin Formation.

It has been implemented the frequency domain electromagnetic method using an electromagnetic induction system with 2 and 4 meters distances between coils.

The electromagnetic induction system was operated in order to characterized superficial electrical properties patterns of the terrain in two distinct investigation depths and then infer others susceptible zones of cracking.

The interpretation is possible due to direct plant visualization of calculated data from the observed electromagnetic field components.

Previously, it has been identified a recurrent crack in rain season which is originated mainly by piping processes, in combination with the deformation of the investigated area due to land subsidence.

## 1. INTRODUCCIÓN

La extracción del agua subterránea en la Cuenca de México está íntimamente relacionada con el incremento exponencial de la población a partir de la segunda mitad del siglo XX. Sobre esta región hidrológica habitan 21.94 millones de personas que viven bajo una situación general de escasez grave con una disponibilidad natural media *per cápita* de apenas 164 m<sup>3</sup>/hab/año (CONAGUA, 2012). Sumada a una ineficaz planeación urbana y falta de conciencia sobre el uso de los recursos, la sobreexplotación del agua subterránea repercute negativamente en el sistema acuífero causando el abatimiento general del nivel freático, compactación de las arcillas lacustres, subsidencia del terreno, pérdida de carga hidráulica, inundaciones en temporada de lluvias, reducción del coeficiente de almacenamiento del acuífero, inversión del gradiente hidráulico, contaminación del agua y agrietamiento de los depósitos lacustres. Este último problema es responsable del deterioro de viviendas e infraestructura urbana, cuyo mantenimiento representa un gasto económico para el gobierno local (e.g. González-Morán *et al.*, 1999; Álvarez-Manilla *et al.*, 2001; Holzer y Galloway, 2005; Cabral-Cano *et al.*, 2008).

La extracción del agua subterránea en la Cuenca de México abastece alrededor del 70% del consumo de este recurso en la región; el sistema acuífero del cual se sobreexplota el agua está integrado por varias unidades geológicas, cuyas propiedades mecánicas e hidráulicas en conjunto con sus características estructurales y estratigráficas están bien descritas en los trabajos sobre la geología de la Cuenca de México (e.g. Marsal y Mazari, 1959; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Rodríguez y Ochoa, 1989; Enciso-De la Vega, 1992; Vázquez-Sánchez, 1995; Díaz-Rodríguez, 2006; Ovando-Shelley *et al.*, 2003; Ovando-Shelley *et al.*, 2007).

Uno de los problemas presentes en las unidades superficiales que confinan al acuífero y que han devenido a causa del régimen de extracción en la Cuenca de México es la subsidencia, la cual se ha descrito y estudiado con ayuda de datos

de bancos de nivel, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y datos de Radar de Apertura Sintética Interferométrica InSAR, entre otras técnicas (e.g. Lesser y Cortés, 1998; Carreón-Freyre y Cerca, 2006; Cabral-Cano *et al.*, 2008; López-Quiroz *et al.*, 2009; Osmanoğlu *et al.*, 2011; Arroyo *et al.*, 2013).

Aunado a la subsidencia, el agrietamiento del suelo es un problema que afecta calles, viviendas e infraestructura pública y privada. Se han propuesto diversos mecanismos de formación de grietas y fracturas entre los que destacan los procesos de tubificación, subsidencia por consolidación y actividad sísmica (e.g. Jasches y Holzer, 1979; Holzer y Pampeyan, 1981; Jasches y Holzer, 1982; Sandoval y Bartlett, 1991; Rao, 1996; Rojas *et al.*, 2002; Holzer y Galloway, 2005; Carreón-Freyre *et al.*, 2006; Ovando-Shelley *et al.*, 2007; Budhu y Shelke, 2008; Carreón-Freyre, 2011; Li y Arroyo, 2011).

Para la resolución de dichas problemáticas se requiere como primer paso un estudio sistemático que permita conocer las características y propiedades físicas del subsuelo. Es por ello, que entre las técnicas geofísicas que se han implementado en investigaciones relacionadas con los problemas derivados de la extracción del agua subterránea están los métodos geofísicos de prospección electromagnética (e.g. McNeill, 1991; Carreón-Freyre *et al.*, 2003; Carreón-Freyre y Cerca, 2006; Monteiro-Santos *et al.*, 2006; Martínez-Retama *et al.*, 2007; Avila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008); así también, los métodos eléctricos (e.g. Shevvin *et al.*, 2003; Bauer *et al.*, 2006; Suski *et al.*, 2010; Arango-Galván *et al.*, 2011); en correlación con los métodos gravimétricos y sísmicos (e.g. Jasches y Holzer, 1979; Haneberg *et al.*, 1991; Campos-Enríquez *et al.*, 1997; Pacheco-Martínez *et al.*, 2006; Pacheco-Martínez, 2007; Pacheco-Martínez y Arzate-Flores, 2007).

Debido a la facilidad y gran rapidez de adquisición de mediciones, el presente trabajo de tesis se enfoca en el mapeo de la conductividad eléctrica del subsuelo haciendo uso del equipo de inducción electromagnética para localizar patrones anómalos e identificar rasgos de posibles estructuras geológicas en toda la extensión de un terreno de concurrencia en San Antonio Tecómitl, en la

delegación Milpa Alta del Distrito Federal, donde se ha reportado la aparición frecuente de grietas y fracturas que afectan calles y viviendas. Posterior al procesamiento de los datos observados, se elabora una interpretación sobre la continuidad lateral y vertical de posibles anomalías a partir de las secciones horizontales que constituyen dos profundidades de investigación, tomando en cuenta las características geológicas y urbanas del área de estudio.

Para la orientación de las actividades, se proponen los siguientes objetivos:

#### Objetivo general

- Localizar zonas vulnerables al agrietamiento del subsuelo en el deportivo Tecómitl, en la localidad de San Antonio Tecómitl de la delegación Milpa Alta a partir de la interpretación de los datos adquiridos con el equipo de inducción electromagnética.

Para alcanzar éste, se implementarán las siguientes acciones como objetivos particulares:

- Documentar bibliografía sobre los fundamentos teóricos del método electromagnético, características geológicas de la zona y otros casos de estudio que aborden problemáticas similares.
- Adquirir dos mallas de datos en campo con la instrumentación propuesta para la configuración de bobinas horizontales coplanares a 1.89 y 3.77 metros de separación Tx-Rx.
- Conocer la distribución de la resistividad aparente con ayuda de la representación en mapas 2D para la visualización de los datos.

Cabe resaltar, que la implementación de esta técnica en este trabajo sirve como primera etapa en un proceso de exploración que involucre otras técnicas geofísicas (método eléctrico, potencial o inclusive electromagnético en otra modalidad) que sirvan para definir más a detalle la problemática que se aborda y que requieran, dado su mayor costo de operación, mayor información para su planificación su ejecución en campo.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA. ECUACIONES DE MAXWELL.

Las ecuaciones de Maxwell representan expresiones matemáticas de observaciones experimentales y que por su validez macroscópica, se aceptan como principios físicos que rigen sobre cualquier campo electromagnético. En general, concluyen que cuando los campos son estáticos,  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  son independientes; sin embargo, cuando los campos varían temporalmente, los campos coexisten entre ellos.

#### Ley de Gauss eléctrica

Esta ecuación se deriva de la Ley de Coulomb y relaciona el flujo del campo de desplazamiento eléctrico  $\mathbf{D}$  ( $\mathbf{D}=\epsilon_0\mathbf{E}$ ) con la densidad de carga libre contenida en un volumen cerrado; es decir, la divergencia de  $\mathbf{D}$  depende exclusivamente de la densidad de carga libre que reside en la superficie de un conductor cargado (Reitz *et al.*, 1986).

#### Ley de Gauss magnética

Intuitivamente se puede saber que la divergencia de  $\mathbf{B}$  es cero, dado que el flujo de  $\mathbf{B}$  a través de cualquier superficie cerrada es siempre igual a cero.

En contraste con el caso eléctrico, donde la divergencia depende de la densidad de carga neta ya que la carga puede existir en unidades individuales de signo opuesto, el resultado de la divergencia magnética implica que no pueden existir cargas magnéticas libres o unidades individuales de carga magnética análogas a las de carga eléctrica (monopolos magnéticos) (Wangness, 1983).

#### Ley de inducción de Faraday

Cuando una carga se mueve a través de un conductor siguiendo una trayectoria cerrada, el campo eléctrico es conservativo y el trabajo producido por las fuerzas electroestáticas es nulo; en otras palabras, el flujo magnético a través de una

superficie encerrada en la trayectoria es constante. Sin embargo, si el flujo magnético varía con el tiempo, se produce una fuerza electromotriz inducida que actúa en dirección opuesta al flujo magnético que lo produce. Dicha variación del flujo puede ocurrir si el vector de inducción magnética varía con el tiempo, si la trayectoria que sigue la carga se traslada o rota, encerrando así distintos valores de  $\mathbf{B}$ , o bien por la combinación de ambas situaciones (Wangness, 1983).

La ley de inducción de Faraday expresa la relación entre las derivadas espaciales del campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y la variación temporal del campo magnético  $\mathbf{B}$  en un punto (Lorrain *et al.*, 1988).

### Ley de Ampere

La Ley de Ampere es un caso particular de la Ley de Biot – Savart, la cual señala que la integral de línea de la componente tangencial del campo magnético al rededor de una trayectoria cerrada es igual a la corriente neta encerrada por la misma trayectoria (Edminister, 1993). A partir de esta ecuación, es posible deducir el campo magnético  $\mathbf{H}$  si se conoce la intensidad de corriente circulando en un conductor.

<b>Ecuaciones de Maxwell</b>	<b>Forma diferencial en el dominio del tiempo</b>	<b>Forma diferencial en el dominio de la frecuencia</b>
<b>Ley de Gauss eléctrica</b>	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$
<b>Ley de Gauss magnética</b>	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
<b>Ley de Faraday</b>	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -i\mu_0\omega \mathbf{H}$
<b>Ley de Ampere</b>	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}$	$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\varepsilon\omega)\mathbf{E}$

**Tabla 2.1 Ecuaciones de Maxwell**

Cuando el medio en el cual se propagan los campos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  variantes en el tiempo se asumen isotrópicos, homogéneos y lineales, los parámetros de conductividad eléctrica  $\sigma$ , permitividad eléctrica  $\epsilon$  y permeabilidad magnética  $\mu$  son constantes; en tales condiciones, las ecuaciones que rigen el comportamiento de  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  se simplifican a partir de las ecuaciones constitutivas (Cheng, 1997):

$$D = \epsilon E \quad \dots(2.1)$$

$$H = B / \mu \quad \dots(2.2)$$

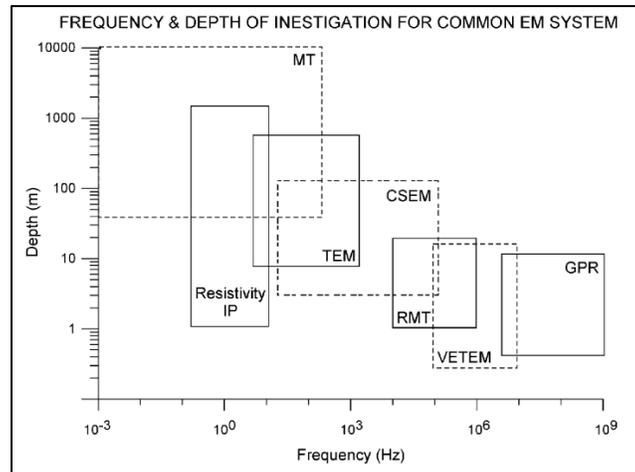
$$J_f = \sigma E \quad \dots(2.3)$$

## 2.2 PRINCIPIOS DEL MÉTODO FDEM

Los métodos electromagnéticos han sido desarrollados recientemente para el mapeo y distribución vertical de la conductividad eléctrica del subsuelo. Los fines son tan diversos como la identificación geológica, delineación de plumas de contaminación, investigaciones hidrogeológicas, conservación del suelo, intrusión salina, búsqueda de estructuras geológicas y minerales, investigaciones geotécnicas, arqueológicas y en agricultura (e.g. McNeill, 1991; Meju *et al.*, 2000; Sudduth *et al.*, 2001; Pellerin y Wannamaker, 2005, Martinelli y Orsella, 2010; Robledo y Martinelli, 2011, Bonomo *et al.*, 2012).

Cuando la variación temporal del campo magnético primario es producto de la conclusión abrupta de un pulso de corriente, la onda electromagnética es transitoria y se halla en el dominio del tiempo (TDEM). Por otro lado, si se produce una onda continua debida a la naturaleza de una corriente alterna, se dice que el método está en el dominio de la frecuencia (FDEM). El equipo que generalmente se usa consta de un par de bobinas (transmisor y receptor) aunque en la práctica también se suele implementar cables largos y espiras cuadradas (Milsom, 2003). En el caso de bobinas, parte de la magnitud de la anomalía depende del momento magnético entre éstas, el cual es proporcional al número de vueltas, el área

transversal y la corriente que circula en ellas; la forma de la anomalía está ligada a la geometría del sistema y las propiedades físicas de los cuerpos conductores.



**Figura 2.1 Rango de frecuencias y de profundidad efectiva para valores típicos de resistividad de algunos métodos electromagnéticos (Pellerin y Wannamaker, 2005).**

Las ventajas del método electromagnético en el dominio de la frecuencia son: la rapidez de la operación en campo, ya que no se necesita del contacto directo entre los instrumentos de medición y el suelo; mayor profundidad de investigación con menores costos en comparación con los métodos que emplean corriente directa, excelente resolución lateral de las propiedades eléctricas dada la facilidad con que se pueden tomar grandes cantidades de lecturas; simples cálculos para determinar la conductividad en un modelo estratificado simple. Por otro lado, algunas desventajas son el rango dinámico, dado que a valores de resistividad altos se vuelve más difícil inducir corrientes en el subsuelo y a valores altos de conductividad, los cálculos se vuelven más complejos a medida que las relaciones pierden linealidad (McNeill, 1980; Robledo *et al.*, 2011).

### *Sistemas de Inducción Electromagnética*

El sistema más común en los métodos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia consta de dos bobinas coplanares en posición horizontal o vertical: un transmisor y un receptor separados una distancia fija  $s$ .

Una bobina puede ser descrita como horizontal o vertical dependiendo de la posición relativa de ésta con la superficie. Adicionalmente, un arreglo de bobinas puede ser caracterizado como coplanar, coaxial u ortogonal dependiendo si se sitúan sobre un mismo plano, si comparten el mismo eje axial o si son perpendiculares entre sí respectivamente. Los arreglos coplanares y coaxiales comparten un máximo acoplamiento y se ven fuertemente afectados por cambios en la separación entre bobinas. Por otro lado, en los arreglos ortogonales el acoplamiento es mínimo, pues las líneas de flujo del transmisor actúan paralelamente sobre el plano que contiene al receptor; las mediciones en este tipo de sistema están afectadas por pequeños desajustes en la orientación de las bobinas más que en su separación.

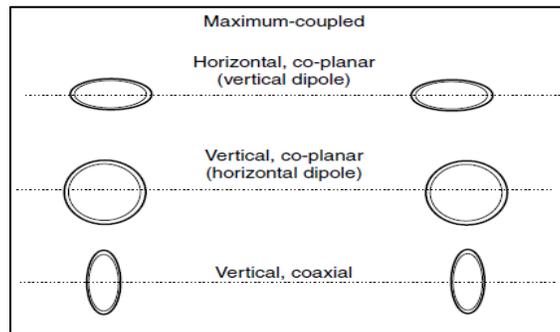


Figura 2.2 Principales tipos de arreglos entre bobinas (Milsom, 2003).

### Respuesta electromagnética

La respuesta electromagnética observada en el receptor provee información acerca de la interacción entre el campo primario producido en el transmisor y el campo secundario inducido en el subsuelo opuesto al primario. La respuesta en el receptor será una fuerza electromotriz inducida total producto de la suma de ambos campos.

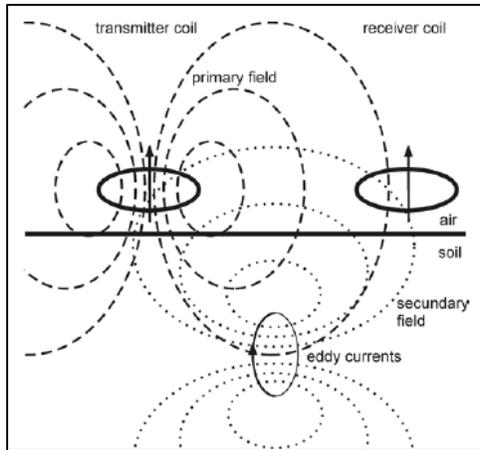
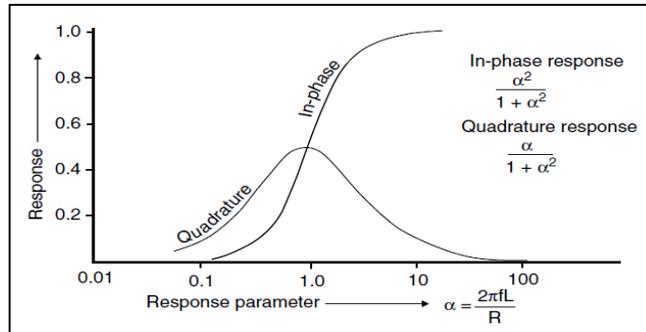


Figura 2.3 Diagrama representativo del acoplamiento entre los campos, homólogo de un circuito de 3 espiras (Simpson, 2009).

Esta respuesta es proporcional al factor de acoplamiento  $M_{ts}M_{sr}/M_{tr}L$ , el cual describe la parte de la respuesta que depende de la geometría del sistema. La otra parte de la contribución se debe a la función de respuesta, la cual está definida por el parámetro de respuesta  $\alpha = \omega L/R$  que es directamente proporcional a la frecuencia de trabajo y la autoinductancia e inversamente proporcional a la resistencia del medio.

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_p} = -\frac{M_{ts}M_{sr}}{M_{tr}L} \left( \frac{\alpha^2 + i\alpha}{1 + \alpha^2} \right) \quad \dots(2.4)$$

El cociente entre las fuerzas electromotrices inducidas es una cantidad compleja la cual se puede dividir en dos partes que la componen: la parte real de la respuesta, o componente en fase con respecto al campo primario, y su parte imaginaria, o componente en cuadratura, desfasada  $\pi/2$  del campo emitido por el transmisor.



**Figura 2.4 Función de respuesta de un sistema horizontal de bobinas para medios de distintas resistividades y frecuencia fija en función del parámetro de respuesta (Milsom, 2003).**

Cuando la resistividad del medio es muy alta, la intensidad de las corrientes inducidas es poca y domina la parte imaginaria de la función de respuesta (componente en cuadratura) la cual está relacionada proporcionalmente con la conductividad del subsuelo (límite resistivo).

El caso contrario ocurre cuando el medio posee una conductividad elevada o en su defecto, se trabaja con altas frecuencias. En este escenario sólo existe la componente en fase y la función de respuesta, inversamente proporcional a la conductividad, tiende a la unidad; es decir, el campo magnético secundario alcanza la máxima respuesta que es capaz de producir (límite inductivo). Entonces, la respuesta en el receptor estará definida por los parámetros geométricos del sistema (Butler, 2005).

#### Respuesta electromagnética en condiciones de Número de Inducción Bajo

La respuesta electromagnética considerando el modelo cuasiestático para las configuraciones dipolares verticales y horizontales coplanares están en función de la separación entre bobinas  $s$  y la constante de propagación  $\gamma$  (McNeill, 1980; Butler, 2005):

$$\left( \frac{H_s}{H_p} \right)_V = \frac{2}{(\gamma s)^2} \left\{ 9 - \left[ 9 + 9\gamma s + 4(\gamma s)^2 + (\gamma s)^3 \right] e^{-\gamma s} \right\} \quad \dots(2.5)$$

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right)_H = 2 \left[ 1 - \frac{3}{(\gamma s)^2} + \left[ 3 + 3\gamma s + (\gamma s)^2 \right] \frac{e^{-\gamma s}}{(\gamma s)^2} \right] \quad \dots(2.6)$$

Sin embargo, estas complicadas relaciones involucran cálculos complejos en función de la frecuencia y la conductividad. Con el objetivo de simplificar las ecuaciones anteriores y además proveer mediciones directas de la conductividad eléctrica del subsuelo, el sistema debe operar en condiciones de un Número de Inducción Bajo ( $B \ll 1$ ), el cual se define como el cociente de la separación entre el transmisor y receptor sobre la penetración efectiva (McNeill, 1980; Butler, 2005; Brosten *et al.*, 2011). Y se puede expresar de la siguiente manera:

$$B = \frac{s}{\delta} = \frac{s}{\sqrt{\frac{2}{\sigma_a \omega \mu}}} \quad \dots(2.7)$$

Si se cumple la condición mencionada con anterioridad, el par de ecuaciones anteriores puede aproximarse a una sola expresión más simple:

$$\left(\frac{H_s}{H_p}\right) = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad \dots(2.8)$$

Para que se establezca el rango de Inducción Bajo, la separación entre bobinas debe ser menor a la profundidad de penetración efectiva en el medio; con esto, se busca que la frecuencia a la que trabaja la corriente de las bobinas sea tan pequeña que se pueda despreciar cualquier acoplamiento magnético entre éstas. Para ello, algunos equipos estiman una conductividad general del subsuelo a partir de la calibración previa a la adquisición y después se calcula la frecuencia de trabajo de manera que satisfaga siempre la siguiente ecuación:

$$\omega \ll \frac{2}{\mu_0 \sigma s^2} \quad \dots(2.9)$$

Por otro lado, existen en el mercado otros equipos de inducción electromagnética en los que el operador tiene la capacidad de elegir una o varias frecuencias entre un rango o trabajan a una determinada frecuencia.

Por otra parte, bajo la restricción de Número de Inducción Bajo en un medio homogéneo, se garantiza que la conductividad aparente sea proporcional a la componente en cuadratura de la respuesta electromagnética (Huang y Won, 2000). La conductividad aparente medida por los sistemas de inducción electromagnética es la respuesta promediada de las distintas conductividades del subsuelo con la profundidad, la cual depende las características hidráulicas del medio (Morris, 2009; Sudduth *et al.*, 2012).

De este modo, se tiene la siguiente relación inversa para calcular la conductividad aparente a partir de la componente en cuadratura así como la susceptibilidad magnética de la componente en fase (Frischknecht *et al.*, 2006; Simpson, 2009):

$$\sigma_a \approx \frac{4}{\omega s^2 \mu_0} \text{Im} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad \dots(2.10)$$

$$\chi = 2 \text{Re} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad \dots(2.11)$$

Las figuras 2.5 y 2.6 ejemplifican los efectos que tiene la separación entre bobinas y la altura del instrumento sobre la conductividad aparente, operando en el Número de Inducción Bajo, para los principales tipos de arreglos (horizontal coplanar, vertical coplanar y perpendicular). En general, se puede apreciar que conforme decrece la separación entre bobinas, la exactitud de los instrumentos aumenta debido a que el área sobre la cual se promedia la conductividad disminuye así como también el nivel de ruido en la práctica sobre la región que contribuye a la medición. La configuración coplanar horizontal se ve más afectada por la separación entre el transmisor y receptor en comparación con los sistemas coplanar vertical y perpendicular debido a la sensibilidad de esta modalidad. Además, independientemente del arreglo utilizado, mientras más resistivo sea el medio la lectura es más precisa, pues la respuesta depende principalmente de la componente imaginaria del campo electromagnético y se desprecian los efectos de la geometría.

Incrementar la altura del instrumento disminuye la amplitud de las mediciones sobre la conductividad aparente, siendo el sistema horizontal el menos afectado; sin embargo, la profundidad de investigación aumenta. El cociente entre la conductividad aparente obtenida entre los arreglos verticales y horizontales puede ser útil para identificar si la conductividad del medio incrementa o disminuye con la profundidad (Morris, 2009).

Existen otros factores que intervienen en la profundidad de investigación que, a diferencia de los anteriores (frecuencia, separación y configuración de bobinas, altura del instrumento, etcétera), no pueden ser determinados por el operador, como son fuentes de ruido antropogénico, clima, complejidad y dimensiones geológicas (Huang, 2005).

Por último, existen algunas variables que intervienen en la calidad de los datos adquiridos por los sistemas de inducción electromagnética, tales como la temperatura del aire, la humedad y contenido volumétrico de agua en el suelo, así como los efectos de la adquisición en movimiento. Sus efectos muchas veces pueden ser despreciables y su corrección exige el conocimiento de elementos difíciles de adquirir por su temporalidad o inmediatez (Sudduth *et al.*, 2001).

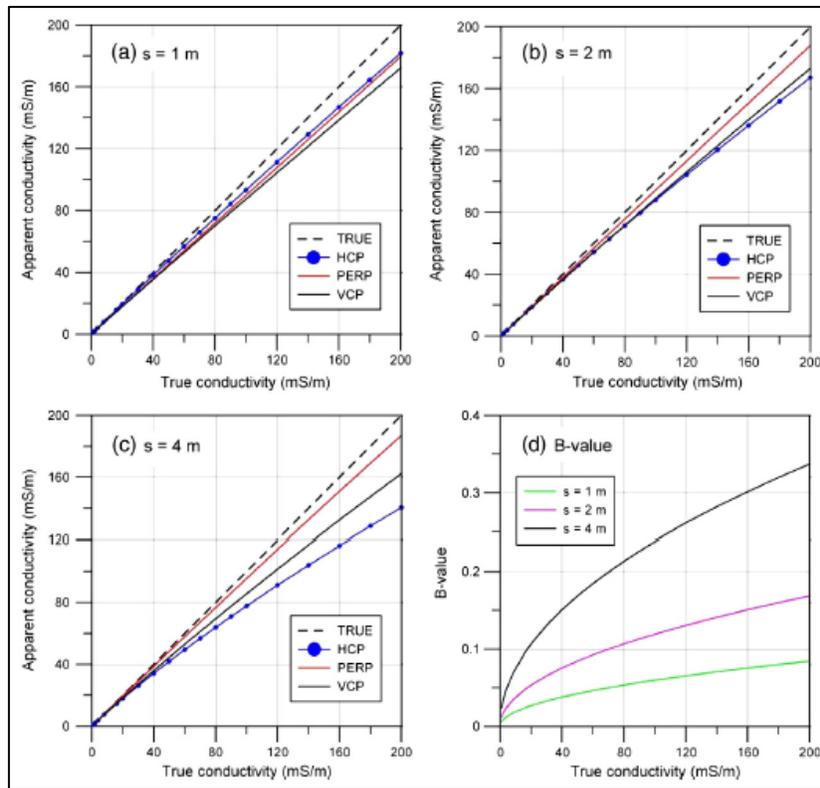


Figura 2.5 Variación de la conductividad aparente con la separación entre bobinas en tres distancias diferentes (a, b, c) y el Número de Inducción correspondiente (d) para los arreglos coplanar horizontal (HCP), coplanar vertical (VCP) y perpendicular (PERP) (Beamish, 2011).

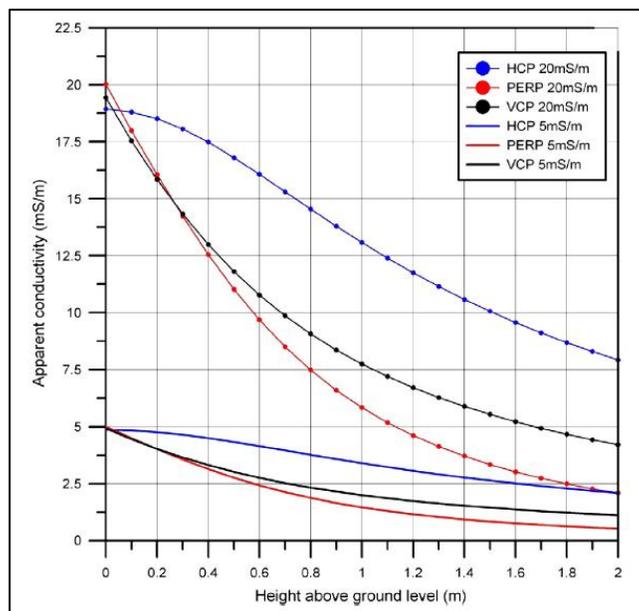


Figura 2.6 Variaciones de la conductividad aparente en función de la altura del instrumento para los arreglos coplanar horizontal (HCP), coplanar vertical (VCP) y perpendicular (PERP) (Beamish, 2011).

### 3. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 GEOGRAFÍA FÍSICA

La Cuenca de México pertenece a la familia de cuencas endorreicas de tipo tectónico-volcánico del Cinturón Volcánico Transmexicano (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2008); se haya a una altitud promedio de 2000 m.s.n.m., ocupando un área aproximada de 9000 km<sup>2</sup> (Rodríguez y Ochoa, 1989). Su extensión geográfica se ve demarcada hacia el este por la Sierra Nevada, hacia el oeste por la Sierra de Las Cruces; al norte por las Sierra Pachuca, Tepotzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán; hacia el sur por la Sierra del Chichinautzin, cortina natural que propició la formación de los grandes lagos hace 0.7 Ma y junto con estos, el depósito de los sedimentos lacustres (Díaz-Rodríguez, 2006).

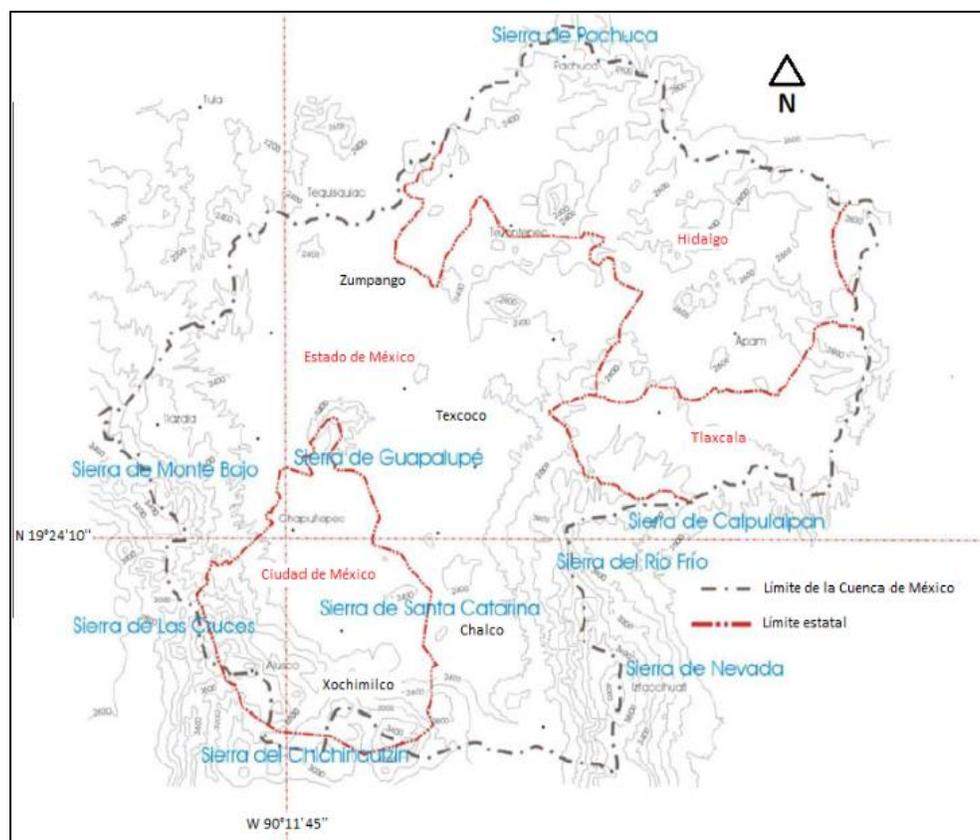


Figura 3.1 Mapa topográfico de la Cuenca de México (GDF-SMA, 2002).

## 3.2 HIDROESTRATIGRAFÍA

### Terciario

Descansando discordantemente sobre el basamento calcáreo del Cretácico, se caracterizan las formaciones que representan el acuífero granular principal cuya edad abarca del Eoceno tardío al Plioceno temprano y que está conformado por rocas volcánicas y derrames lávicos de composición andesítica a dacítica intensamente fracturadas intercaladas con depósitos clásticos aluviales, brechas volcánicas y piroclastos de misma composición del grupo Balsas, supergrupo Pachuca y grupo Anáhuac, en orden cronológico (Enciso-De la Vega, 1992).

### Cuaternario

De acuerdo con Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), corresponden a este período rocas volcánicas y derrames lávicos intercalados con capas de lahares, ignimbritas, cenizas cristalinas y vítreas, lapillis y tobas pumíticas de composición andesítica-basáltica y andesítica de anfíbol a dacítica cristalina del grupo Taranguense y/o las Formaciones volcánicas de tipo estromboliano Llano Grande, El Pino, Iztaccíhuatl, Popocápetl y Chichinautzin representan la actividad volcánica que, de acuerdo con las relaciones estratigráficas complementadas con los fechamientos isotópicos de carbono 14 y de polaridad magnética, cubre desde el Plioceno tardío al Holoceno y conforman los estratos superiores del acuífero.

La Formación Popocápetl, al sureste de la cuenca, cubre discordantemente la porción meridional de la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita, por su contemporaneidad, hacia el poniente con la Formación Chichinautzin y los clastos fluviales de las llanuras.

Por su parte, se nombra como Formación Chichinautzin a todo el volcanismo monogenético estromboliano que consiste en lavas extensas vesiculares y masivas de composición andesítica-basáltica de aproximadamente 1800 metros de espesor.

Descansando encima de estas unidades, se encuentran los depósitos aluviales del cuaternario acumulados penecontemporáneamente a los depósitos volcánicos del cuaternario rellenando amplios valles socavados por los depósitos piroclásticos del Plioceno así como depresiones tectónicas, como el graben de Chalco. Se componen dichos depósitos de intercalaciones de gravas, arenas y tobas de grano fino con lentes de arcillas y limos y hacia la base de esta unidad magras y calizas lacustres. Posee una potencia variable, siendo máximo hacia el centro del valle con 500 metros aproximadamente y se adelgaza hacia las márgenes de la llanura y forma la parte superior del acuífero granular de la región. En las zonas norte y sur incluyen material poco consolidado de gran heterogeneidad granulométrica compuesto por fragmentos con tamaño de grava, arena, limos y arcilla, conteniendo localmente marga, calizas lacustres, tierra diatomácea, turba y travertino intercalado con tobas de grano fino y lapílicas.

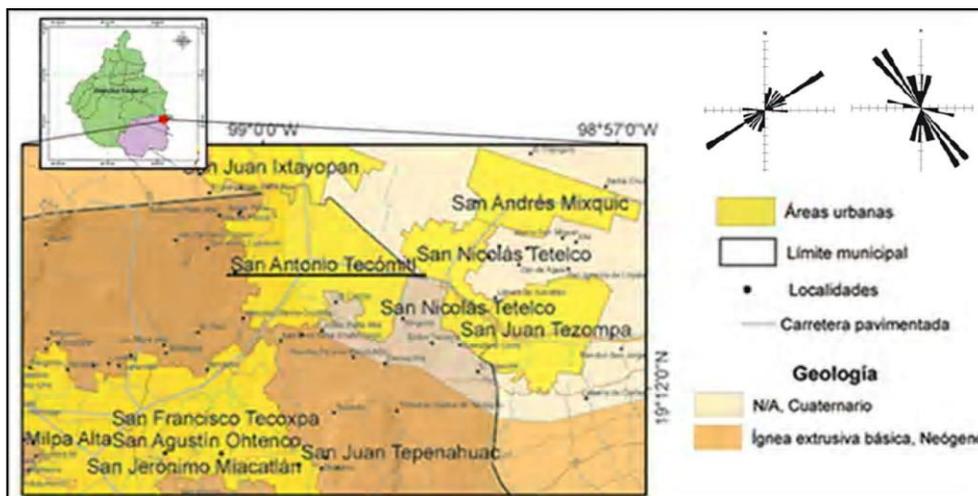
Por último, se tienen los depósitos aluviales de sedimentos clásticos que forman una gran altiplanicie lacustre a 2200 metros compuesta de arcillas bentoníticas y montmorilloníticas calcáreas con intercalaciones de arenas finas, limos, cenizas vítreas, líticas y pómez, horizontes de toba lítica consolidada, lapillis pumíticos y líticos e incluso un derrame lávico basáltico, productos contemporáneos a la actividad volcánica del Cuaternario de las Formaciones Popocatepetl y Chichinautzin, acumulados en los grandes lagos al cierre de la cuenca durante la formación de la Sierra del Chichinautzin, los cuales caracterizan al acuitardo confinante por su baja permeabilidad y cuyo espesor varía desde los 30 hasta 300 metros hacia el interior de la cuenca y disminuyen hacia las márgenes de la planicie (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

### **3.3 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO**

Hacia finales del siglo XIX, se inicia el registro del hundimiento en el centro de la ciudad (5 cm/año). En la década de los cuarenta, con la construcción de pozos profundos, se agrava el fenómeno; sin embargo, es hasta los sesentas cuando se

expande la extracción hacia la periferia de la ciudad para solventar la creciente demanda. A partir de entonces se comienza el registro del hundimiento del terreno en las zonas del sur y sureste de la Cuenca de México (Lesser y Cortés, 1998), así como la aparición de grietas y fracturas asociadas a la zona de transición entre los depósitos sedimentarios clásticos y las rocas volcánicas que rodean la cuenca (Ortiz-Zamora, 2007).

Sobre el área circundante a la porción sureste de la Cuenca se encuentra la zona de estudio del presente trabajo en el poblado San Antonio Tecómitl, delegación Milpa Alta. Como puede observarse en el acercamiento del mapa geológico, en las inmediaciones de dicha localidad se encuentra el contacto superficial entre las rocas ígneas extrusivas básicas de la Formación Chichinautzin, la cual consiste en lavas andesítico-basálticas masivas y vesiculares con los depósitos aluviales poco consolidados de gran heterogeneidad granulométrica intercalados con los depósitos lacustres del Cuaternario (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).



**Figura 3.2** Mapa geológico del área de estudio. San Antonio Tecómitl, Milpa Alta. Rosetas de rumbo para esfuerzos compresivos P (izquierda) y esfuerzos cortantes T (derecha) (Mora-Chaparro, 2011).

Cabe mencionar, que en un trabajo reciente elaborado para las autoridades de Protección Civil de la Delegación Milpa Alta (2012), se han identificado dos fallas normales que responden a esfuerzos compresivos con dirección preferencial SW-NE y esfuerzos cortantes NW-SE y NS, las cuales podrían tener influencia sobre la

formación de nuevas fracturas. Se infiere un sistema de fallas normales regionales sepultadas pertenecientes al período de deformación más reciente, aún activo, denominado por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) como Fallas del Plio-Cuaternario, con base en el claro alineamiento de conos cineríticos monogenéticos de las formaciones cuaternarias El Pino y Chichinautzin. La dirección preferencial de rumbo de este sistema es Oeste-Este y N55E para el sistema conjugado. La interpretación estructural indica que este sistema de fallas se originó por esfuerzos compresivos en dirección S75W, que a su vez propiciaron esfuerzos de tensión en dirección N15W.

### **3.4 MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO**

Se han propuesto y estudiado varios mecanismos de formación de grietas en sedimentos lacustres de origen natural o antropogénico (*e.g.* Jachens y Holzer, 1982; Sheng y Helm, 1995; Rojas *et al.*, 2002; Carreón-Freyre y Cerca, 2006; Carreón-Freyre *et al.*, 2007; Budhu y Shelke, 2008; Hernández-Marín y Burbey, 2012). Aunque todos ellos se encuentran fuertemente interrelacionados entre sí, se atribuye a la sobreexplotación del agua subterránea como el detonante de varios mecanismos. Entre éstos se distinguen los siguientes:

- Actividad sísmica
- Tubificación retrógrada o erosión por infiltración
- Subsistencia por consolidación

Asociada a la actividad sísmica se encuentra el control estructural y las direcciones de esfuerzos. Dichos procesos tienen influencia sobre las direcciones de propagación de nuevas grietas de orden regional. Al respecto, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) han identificado cuatro etapas de esfuerzos en la geología estructural de la región. En la actividad que prevalece en la actualidad se encuentra un sistema conjugado de fallas normales de rumbo Este-Oeste y N65°E aproximadamente, las cuales se han identificado en diversos trabajos alrededor de la cuenca (Lugo-Hubp *et al.*, 1994; Lugo-Hubp *et al.*, 1995;

Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996; Álvarez-Manilla *et al.*, 2001; García-Palomo *et al.*, 2008; Arce *et al.*, 2008; Carreón-Freyre, 2011).

La tubificación retrograda es el proceso en el cual se da una remoción de partículas del esqueleto sólido de las rocas y suelos por la filtración del agua subterránea bajo un gradiente hidráulico, produciendo una inestabilidad mecánica a nivel granular, misma que afecta el estado de esfuerzos y deformaciones del material al disminuir la cohesión aparente de éste.

La evolución de la erosión puede ser tal que los esfuerzos cortantes devengan en un cambio volumétrico, dando lugar a la formación de cavidades, grietas o fallas superficiales que afectan los primeros 5 metros a profundidad (Li y Arroyo, 2011).

Una vez que se ha formado una grieta, se vuelve más susceptible a la erosión por el flujo de agua subterránea o el flujo superficial que ocurre en temporada de lluvias.

De igual manera, la subsidencia por consolidación tiene su origen en el cambio de las propiedades dinámicas del subsuelo y puede provocar la aparición de grietas y fracturas entre 5 y 200 metros de profundidad. La pérdida de presión de poro sujeta a la extracción del agua provoca un cambio en las propiedades mecánicas del subsuelo y en su respuesta dinámica (Fitts, 2002; Ovando-Shelley *et al.*, 2007). La deformación volumétrica que responde al incremento del esfuerzo efectivo provoca la compactación de los sedimentos clásticos; la consolidación de las arcillas lacustres, dado su alto grado de compresibilidad, es un proceso que puede tomar más tiempo (años o décadas) en comparación con la consolidación en arenas y materiales de alta conductividad hidráulica que puede tomar segundos o minutos (Álvarez-Manilla *et al.*, 2001; Fittz, 2002; Holzer y Galloway, 2005; Díaz-Rodríguez, 2006; Pacheco-Martínez y Arzate-Flores, 2007; Budhu y Shelke, 2008).

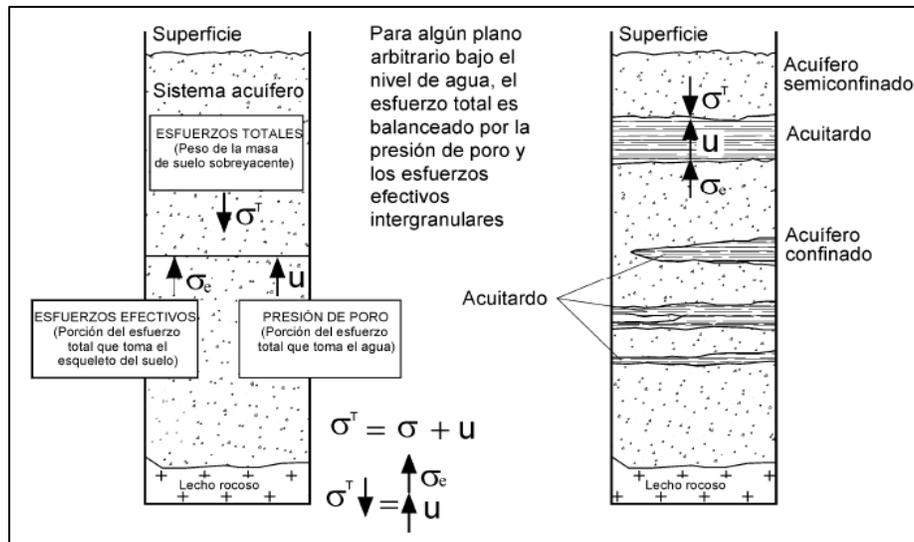


Figura 3.3 Esquema de esfuerzos (Pacheco-Martínez, 2007).

Existen otras variables que intervienen simultáneamente en el proceso de agrietamiento por consolidación como son heterogeneidades de las propiedades hidráulicas, morfología del basamento y espesor del material arcilloso. Estas características, aunadas a una alta compresibilidad y baja plasticidad del medio, favorecen la aparición de grietas y fracturas hacia las regiones de máxima tensión. (e.g. Rojas *et al.*, 2002; Pacheco-Martínez y Arzate-Flores, 2007; Avila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008; Huizar-Álvarez *et al.*, 2011).

Estudios sobre la subsidencia de la Cuenca de México a partir de datos de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) y sistemas de posicionamiento global (GPS), indican tasas de hundimiento promedio entre 100 y 300 mm/año que dependen del espesor del acuitardo superficial en conjunto con el abatimiento del nivel freático (0.1 – 1.5 m/año). Las zonas que muestran mayores daños en obras públicas y viviendas, son aquellas donde el gradiente horizontal de subsidencia es más abrupto (e.g. Carreón-Freyre y Cerca, 2006; Cabral-Cano *et al.*, 2008; López-Quiroz *et al.*, 2008; Osmanoğlu *et al.*, 2009).

El poblado de San Antonio Tecómitl es muy susceptible a los mecanismos descritos con anterioridad debido a su ubicación y características geográficas. El riesgo por hundimiento es el principal problema que afecta al poblado de San

Antonio Tecómitl. Se presentan imágenes y la documentación de varias viviendas, unidades habitacionales y calles afectadas por la aparición de grietas.

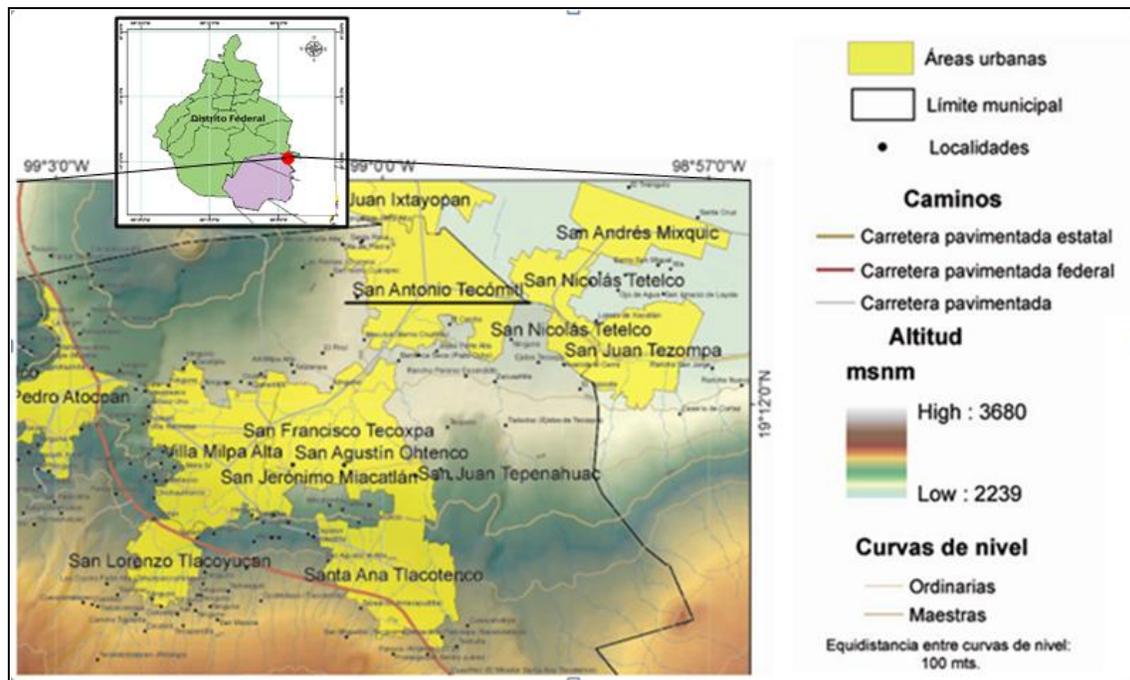


Figura 3.4 Mapa hipsométrico del área de estudio. San Antonio Tecómitl, Milpa Alta (Mora-Chaparro, 2011).

#### 4. IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO

La zona de estudio abarcó una unidad deportiva hacia el norte del centro de San Antonio Tecómitl, en la delegación Milpa Alta del Distrito Federal, a poco más de un kilómetro de distancia sobre la avenida Sur del Comercio. El terreno posee dimensiones de 137X114 metros y se ubica entre las coordenadas 14Q 500650 m Este, 2126070 m Norte y 14Q 500790 m Este, 2126230 m Norte, a una elevación promedio de 2251 m.s.n.m.



Figura 4.1 Zona de estudio. Deportivo Tecómitl, San Antonio Tecómitl, delegación Milpa Alta.

Se dispuso de un conductivímetro de inducción electromagnética CMD de la compañía *Gf Instruments, s.r.o. Geophysical Equipment and Services* con el objetivo de obtener mediciones puntuales de la conductividad aparente del subsuelo y conocer la distribución espacial de dicha propiedad a través de la visualización en planta.

El equipo implementado, aparte de proporcionar medidas puntuales de la conductividad aparente calculada a partir de la componente en cuadratura del campo en el receptor, también otorga la lectura de la componente en fase de la respuesta electromagnética, la cual es proporcional a la susceptibilidad magnética del medio.

Se trabajó con la configuración de Bobinas Horizontales Coplanares a dos distancias diferentes de separación entre transmisor y receptor de 1.89 metros (CMD-2) y 3.77 metros (CMD-4). La frecuencia de muestreo fue de 0.5 segundos y el equipo estuvo a una altura aproximadamente de 1 metro del nivel del suelo.

La profundidad de penetración efectiva de esta configuración es mayor que la obtenida por el arreglo de Bobinas Verticales Coplanares, dado que la respuesta acumulativa de esta última configuración es más sensible a las corrientes inducidas en las capas superficiales. Según el fabricante, las profundidades de investigación para estas configuraciones son aproximadamente 6 y 3 metros respectivamente. Sin embargo, se analiza la sensibilidad vertical del instrumento en el siguiente capítulo para determinar una profundidad de investigación más exacta.

Cabe resaltar que el equipo realiza una calibración previa automática que dura pocos segundos y que consiste en anular el campo primario en el receptor con el fin de medir únicamente el campo secundario, para después calibrar los valores absolutos de las componentes real e imaginaria del campo electromagnético. Idealmente, la calibración se debe llevar a cabo en sobre un medio no conductor, a una altura mínima de un metro y en una zona libre de ruido (Simpson, 2009).

El equipo ajusta la frecuencia de trabajo de manera automática tomando como referencia la ecuación 2.9, variando la frecuencia de cientos de Hz a 100 kHz aproximadamente para asegurar la operación en número de inducción bajo.

Las fuentes de ruido más comunes son líneas de alta tensión, esféricos (relacionados a tormentas eléctricas), objetos metálicos sobre la superficie, cables enterrados en el subsuelo u materiales metálicos portados por el operador.

Otras fuentes de error durante las mediciones consisten en la desalineación entre la bobina transmisora y la receptora durante la manipulación del equipo debido a ráfagas de viento o desequilibrio al caminar.

La adquisición se programó para que fuera de manera continua; en esta modalidad, la velocidad de operación es un factor que afectó las lecturas debido al retraso entre el conductivímetro y el sistema de posicionamiento.

La deriva de las mediciones debido los cambios de temperatura y humedad del ambiental durante la adquisición afecta la resistencia y capacitancia de las piezas electrónicas, por lo que también se considera un factor que afecta la certeza de las mediciones. Este problema se puede corregir al hacer varias calibraciones en un lapso determinado. Sin embargo, dada la relativamente corta duración del trabajo de adquisición se minimizó este problema.

Además, para la adquisición de datos se instaló simultáneamente a la consola CMD un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real de frecuencia simple de gran precisión, con el único propósito de tener las mediciones georreferenciadas.

Previo a la adquisición de los perfiles, cuya disposición se facilitó dadas las características geométricas del lugar, se identificaron y localizaron estructuras superficiales metálicas sobre el terreno que representan anomalías en la conductividad y en la componente en fase ajenas al objetivo de investigación; por ejemplo, luminarias, mallas ciclónicas, arcos de porterías de fútbol, gradas y circuitos eléctricos.

Cada adquisición consta de 48 líneas orientadas W-E aproximadamente, separadas 2 metros entre sí. El mapeo CMD-2 empezó en el extremo sureste y las mediciones se fueron desplazando hacia el norte. Caso contrario a la adquisición con la configuración CMD-4, la cual se hizo en dirección al sur, empezando en el extremo noreste.

La orientación del eje del instrumento se mantuvo perpendicular en relación a la dirección del caminar (modalidad *broadside*). Cuando se trabaja bajo esta modalidad y se atraviesa perpendicularmente al rumbo de una estructura de interés, las anomalías se manifiestan más acentuadas y de mayor amplitud en comparación si el eje del instrumento fuera paralelo a la línea de investigación (*in-line*) (Frischknecht *et al.*, 2006).

La altura del equipo, como se puede ver en la siguiente figura, se mantuvo constante a 1 metro aproximadamente. A medida que incrementa la altura del instrumento se reduce la señal detectada debido a la influencia del espacio ocupado por aire, siendo mayor la pérdida en el sistema de bobinas verticales en comparación con la configuración horizontal (Sudduth *et al.*, 2001).



**Figura 4.2 Trabajo en campo, Noviembre 2012.**

## 5. PROCESADO DE DATOS E INTERPRETACIÓN

La visualización en planta del conjunto de mediciones hechas durante el trabajo de campo, además de ser necesaria para la conceptualización del problema, es el medio más común de interpretación directa de datos adquiridos con sistemas de inducción electromagnética. Aún así, existen metodologías de inversión 1D que se usan para la construcción de modelos (Bongiovanni *et al.*, 2008; Martinelli y Duplaá, 2008; Robledo y Martinelli, 2011).

Los mapas a interpretar requieren de un proceso de depuración parcial sobre los datos que los conforman, siguiendo un esquema formal de criterios de selección y manipulación de estos.

En este sentido, se hallaron mediciones de conductividad aparente negativas que pueden ser generadas por pequeños objetos someros muy conductores, cambio en la velocidad a la que camina el operador o movimientos repentinos del equipo provocados por el viento o desbalance del operador. Estas lecturas fueron eliminadas dado que corresponden con el mal funcionamiento del equipo o con mediciones fuera del rango de resolución del aparato (Beamish, 2011). Además, bajo ninguna circunstancia la representación negativa de esta cantidad escalar tiene sentido como propiedad física del subsuelo.

La frecuencia de muestreo implementada durante la adquisición de datos en campo permitió obtener una lectura cada medio segundo y fue propuesta de tal manera con el fin de obtener mayor resolución lateral para la caracterización geoeléctrica del subsuelo. Sin embargo, el sistema de posicionamiento presentó algunos contratiempos que derivaron en la ausencia de localización geográfica de varias lecturas e incluso en el sobre posicionamiento de otras.

Estas fallas del sistema de posicionamiento se deben al retraso entre la respuesta de éste con respecto a la alta frecuencia de muestreo programada en el conductivímetro. Es posible que disminuyendo la frecuencia de muestreo del conductivímetro se corrija este problema.

Para recuperar las mediciones sin posicionar en las series de datos de las dos configuraciones trabajadas, se implementó la interpolación lineal sobre cada conjunto de datos con ausencia de posición. De esta manera, se acomodaron las coordenadas faltantes asumiendo un espaciamiento a distancia constante.

A su vez, para corregir la acumulación de valores en una única posición, se creó un código en lenguaje Fortran el cual selecciona un solo elemento del conjunto de datos que repiten la misma posición.

Tomando en cuenta la posibilidad de tener mediciones erróneas por efecto de la velocidad de desplazamiento o desajuste del plano que contiene a las bobinas, el criterio de selección de un elemento representativo se basa en el cálculo de la mediana muestral, dado que esta medida de tendencia central representa el valor que se encuentra exactamente a la mitad de un conjunto ordenado de datos. En contraste con la media muestral, cuyo valor puede estar afectado por la presencia de valores atípicos, la mediana es insensible a estos valores (Devore, 2005).

Para llevar a cabo el cálculo de la mediana, el algoritmo identifica las mediciones que prácticamente están superpuestas mediante una condición que evalúa la mínima distancia que debería existir entre cada lectura para considerarlas espacialmente ajenas. Las mediciones que no satisfacen esta condición estructuran un arreglo de dimensión variable en función del tamaño del conjunto de datos con posiciones repetidas. Posteriormente, ordena numéricamente las cantidades de menor a mayor de este nuevo arreglo para cada caso que se presente dicha superposición.

Finalmente, la mediana para cada conjunto de datos superpuestos está en función del número de elementos que componen el arreglo. El cálculo del valor central es posible gracias a un condicional que evalúa si el arreglo posee un número par o impar de elementos.

A la salida del programa, las series de datos de ambas configuraciones se redujeron aproximadamente a la mitad de las dimensiones originales.

Con estas nuevas series se presentaron los mapas de resistividad aparente (inverso de la conductividad aparente) y componente en fase. Se prefirió la resistividad aparente por sobre la conductividad dada la facilidad de interpretación que representa la primera variable.

Para georreferenciar los mapas, se dispuso a transformar a coordenadas UTM las lecturas hechas por el sistema de posicionamiento global conectado al conductivímetro, que inicialmente se adquirieron en coordenadas geográficas.

La construcción de las cuadrículas de los dos pares de mapas requirió de la aplicación del método de interpolación lineal por triangulación. Este método de interpolación exacto es un algoritmo sencillo y rápido que trabaja bien cuando se tiene una enorme cantidad de datos y que conserva muy bien el valor integro de la mayoría de los datos originales. Funciona bien cuando se tienen conjuntos de datos puntuales homogéneamente distribuidos en toda la extensión del área de la cuadrícula y además no extrapola regiones de la misma donde no existen mediciones.

Los mapas que representan la componente en fase de la respuesta electromagnética para las configuraciones CMD-2 y CMD-4 están relacionados con la susceptibilidad magnética de los materiales (figuras 5.1, 5.2), la cual se define como la capacidad de los materiales a incrementar la fuerza de un campo magnético externo (Simpson, 2009). Estos mapas resaltan los efectos superficiales del terreno donde existe infraestructura metálica como luminarias distribuidas linealmente al centro dividiendo simétricamente el terreno y ambos pares de arcos de portería. En presencia de materiales muy conductores, la componente en cuadratura del campo inducido en el receptor tiende a desaparecer; su contraparte real entonces tiende a un valor máximo que es la unidad. En esta situación, la función de respuesta queda en términos únicamente del coeficiente de acoplamiento, el cual depende de las características geométricas del sistema. Cabe mencionar que la componente en fase es una cantidad adimensional que se representa en partes por miles (ppt por sus siglas en inglés *parts-per-thousand*).

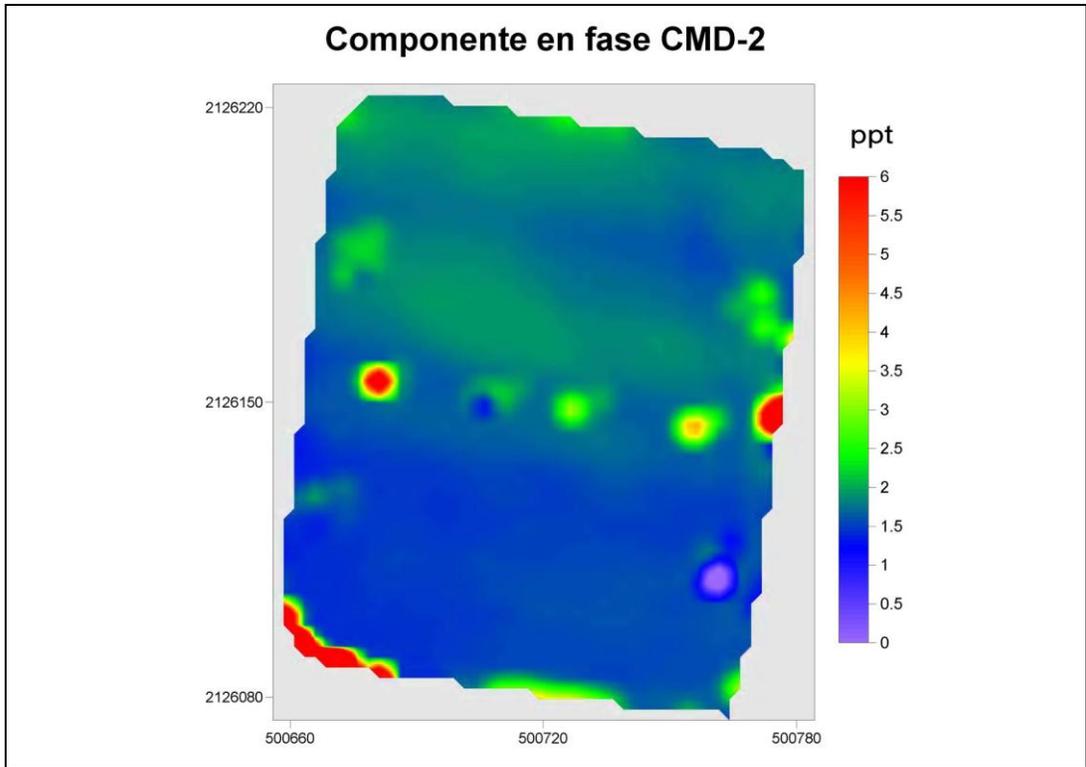


Figura 5.1 Componente en fase para la configuración CMD-2 (partes por miles). Prof. Exploración 3m.

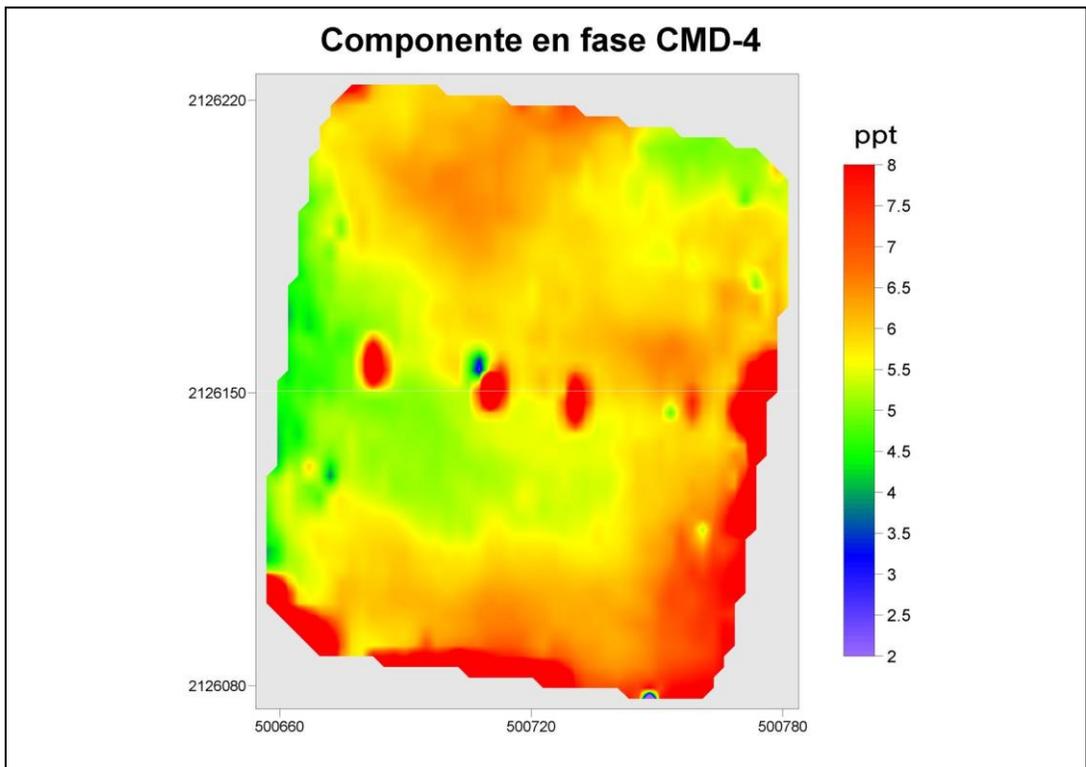


Figura 5.2 Componente en fase para la configuración CMD-4 (partes por miles). Prof. Exploración 6m.

En el mapa de resistividad aparente de la configuración CMD-2 (figura 5.3) se muestra una distribución de valores de resistividad ligeramente mayores al promedio en la zona intermedia del dicho mapa, en un rango de 30 a 35 ohm·m.

Se tiene una distribución similar para el caso de la configuración CMD-4 (figura 5.4), pero a diferencia de la modalidad CMD-2, las resistividades y el contraste entre ellas son menores. Hay que tomar en cuenta que a medida que se investiga a mayor profundidad el área promediada incrementa, es decir que sustratos más conductores, asociados al grado de saturación de los materiales, disminuyen la lectura observada en comparación con lecturas más someras en el mismo punto; además, el número de Inducción aumenta cuando incrementa la distancia entre bobinas, lo que ocasiona la pérdida de exactitud.

Hacia la porción nororiental del mapa de la figura 5.3 resalta una anomalía de valores de alta resistividad aparente que está orientada aproximadamente en dirección N-S. Dicha estructura está enmarcada por un rango de valores que representan las resistividades más elevadas de la zona de estudio y varían entre 30 ohm·m a 35 ohm·m aproximadamente.

De acuerdo con los trabajos de Protección Civil de la delegación Milpa Alta (2012), la franja nororiental de mayor resistividad coincide con una grieta identificada previamente que ha sido atendida en varias ocasiones anteriores debido a su recurrencia en temporada de lluvias. La baja consolidación que posee el material de relleno en la grieta produce el aumento de resistividad, ya que ésta es proporcional a la porosidad del material. En temporada de sequía la porosidad está casi en su totalidad ocupada por un fluido dieléctrico, es decir el aire.

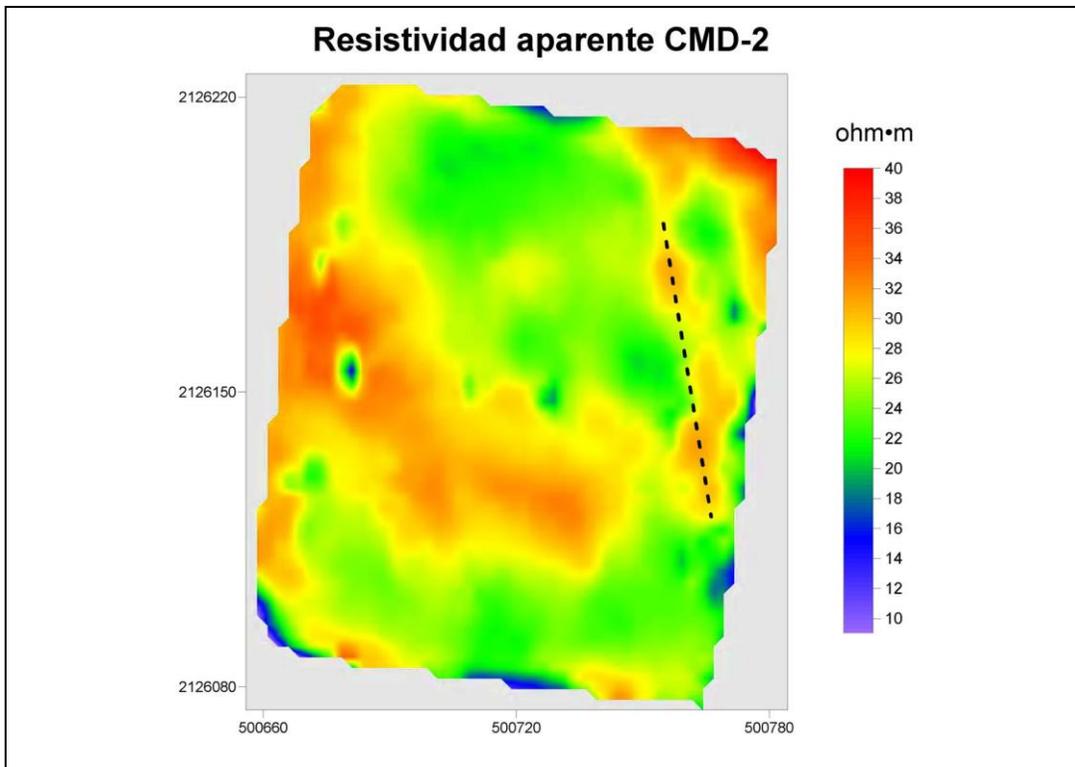
No obstante, a partir de la comparación visual entre los mapas de ambas configuraciones, se establece que la ausencia de una anomalía significativa en la parte nororiental del mapa de resistividad de la configuración CMD-4 indica que la profundidad de la grieta detectada no supera los 6 metros, que es la profundidad aproximada de investigación de esta modalidad.

Por otra parte, la irregularidad de propagación de la grieta y la afectación somera sugiere que el mecanismo de formación sea la pérdida de cohesión del material granular debida a procesos de erosión por fuerzas de infiltración. Las evidencias que sustentan esta afirmación son la aparición frecuente, según las autoridades, de esta estructura sólo en temporada de lluvias y el patrón irregular de ruptura que no corresponde con patrones uniformes de fallas geológicas.

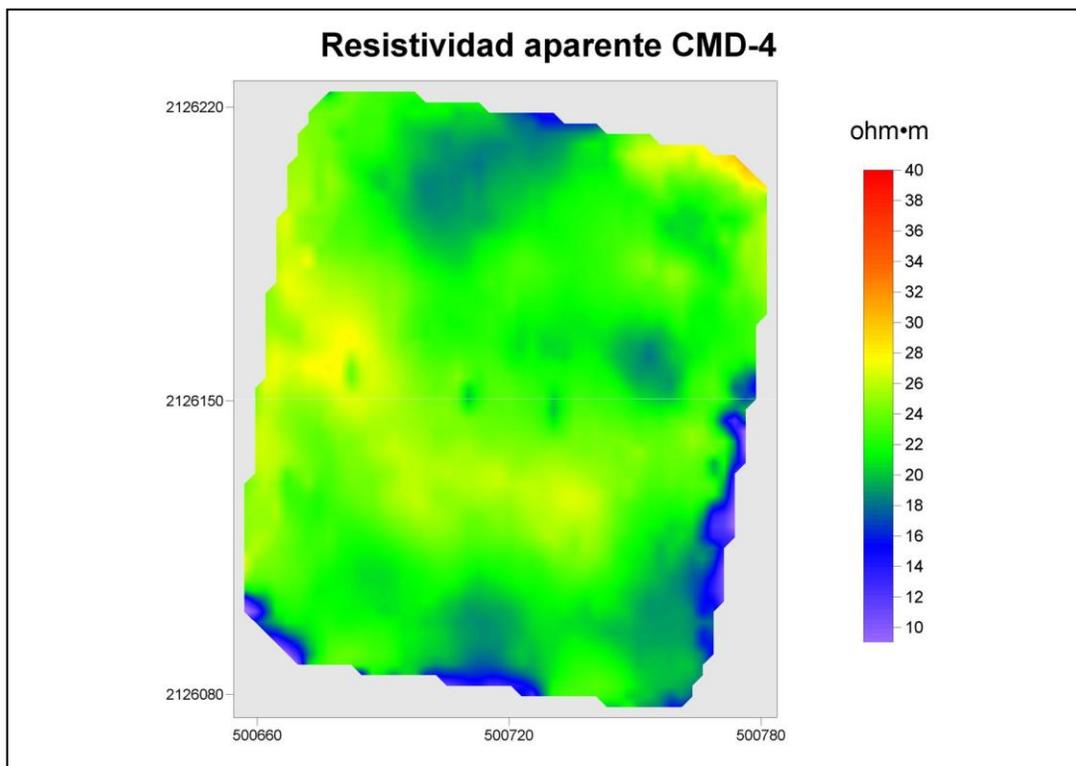
Sin embargo, el rumbo de esta estructura presenta una dirección preferencial NW-SE que se alinea con rasgos topográficos regionales y además, coincide con la dirección de propagación de los esfuerzos cortantes de la región (Protección Civil Milpa Alta, 2012). Por lo que se asume posible que el control estructural también sea un factor de influencia en la aparición de este fenómeno.

Probablemente el arrastre de partículas por acción del flujo de agua subterránea haya actuado con mayor intensidad sobre los intersticios a pequeña escala que pudieran haberse formados como consecuencia de la acumulación de esfuerzos a la que está sometido el terreno, sobre todo en el poblado de San Antonio Tecómitl.

La continuación estructural de la grieta, inferida a partir del análisis visual de los contrastes de textura y tonalidad de la imagen satelital y de la misma bibliografía citada, es imperceptible en los mapas presentados.



**Figura 5.3 Resistividad aparente para la configuración CMD-2 (ohm·m). Prof. Exploración 3m.**



**Figura 5.4 Resistividad aparente para la configuración CMD-4 (ohm·m). Prof. Exploración 6m.**

Si hacia el sureste de la zona estudiada no hay evidencia eléctrica de la extensión de dicha grieta que continúa en la misma dirección, la explicación se debe a que la estabilidad del material de relleno no ha sido alterada aún hacia esta porción del terreno.

De acuerdo a Li y Arroyo (2011) el arrastre de partículas (y por ende el deterioro de la cohesión aparente entre los sedimentos e incremento de su porosidad) es un proceso degenerativo que inicia en la salida del cauce subterráneo y avanza hacia la recarga del mismo. La intensidad del deterioro así como el área de inestabilidad del subsuelo depende de la tasa de infiltración, la cual aumenta durante la temporada de lluvias, y de la dirección de flujo que depende de la topografía.

De acuerdo al contexto geológico de la zona, se puede plantear dos posibles escenarios.

En el primero, existe una distribución de materiales sedimentarios clásticos de mayor compactación en comparación con el medio circundante donde la resistividad aparente es mayor, puesto que disminuye el contenido de agua remanente en los poros. Esto implicaría que existiera una diferencia en la granulometría de la región más compacta con respecto al resto del terreno y que la compresibilidad de ésta sea mayor; o en su defecto, que la compactación en esta zona haya tenido su origen por acción del hombre al momento de adecuar el terreno para su construcción.

En el segundo caso, las regiones donde la resistividad aparente es mayor podrían ser un buen indicador de las zonas del subsuelo que presentan mayor permeabilidad. En temporada de secas, esta región está menos saturada con respecto al medio y en temporada de lluvias la fuerza del flujo subterráneo es mayor hacia esta zona así como el arrastre de partículas. Este ciclo estacional produce cambios en la saturación que afectan las propiedades mecánicas de los sedimentos deteriorando el grado de cohesividad entre las partículas.

Con respecto a la vulnerabilidad del terreno a exhibir otros fenómenos de la misma índole se puede hacer énfasis en la zona intermedia del deportivo Tecómitl, donde

el subsuelo presenta un comportamiento resistivo semejante al patrón donde actualmente se tiene bien identificada la existencia de una grieta superficial.

Si se acepta el supuesto que dicha zona deba su mayor resistividad por una diferencia en la compresibilidad con respecto al área vecina. Bajo un esquema de subsidencia, existirán diferencias en la velocidad de hundimiento entre una zona y otra, la acumulación de esfuerzos cortantes se presentaría sobre el contacto entre los medios. Si aunado a esta situación la plasticidad de los sedimentos es baja, entonces la zona es susceptible de agrietarse.

Por otro lado, si la firma resistiva en esta zona se debe a una menor saturación con respecto al medio que la rodea, el arrastre de partículas producto del flujo de agua subterránea será mayor, la porosidad tenderá a aumentar en contraste con los sedimentos cuyas propiedades mecánicas no han sido modificadas. Se puede inferir que el aumento general de resistividad en la zona intermedia será producto de este incremento de la porosidad de los materiales sujetos a los procesos de tubificación. Esto implica que la pérdida de estabilidad del subsuelo irá en aumento y será proporcional a la falta de cohesividad entre las partículas, hasta el grado de alcanzar la inestabilidad mecánica y el eventual colapso de los materiales por acumulación de esfuerzos.

Sea cualquiera de estas dos interpretaciones, se observa que aproximadamente a 6 metros de profundidad las anomalías resistivas disminuyen en dimensión y el terreno conserva una resistividad de 22 ohm·m, misma que se presenta en ambas secciones. Esto implica que el nivel de compactación tiende a homogeneizarse; o bien, que incrementa la saturación con la profundidad.

En la región de estudio, estos cambios en la granulometría son comunes hacia la zona de transición entre el ambiente de depósito lacustre (compuesto por los sedimentos arcillosos y aluviales clásticos como arenas, tobas, cenizas y otros materiales piroclásticos del Cuaternario) y las elevaciones topográficas relativas a las rocas ígneas extrusivas de la formación Chichinautzin.

### Análisis de Sensibilidad Vertical de los Sistemas de Inducción Electromagnética

Para estimar la profundidad de exploración efectiva de los sistemas de inducción electromagnética se asume que cuando se opera en condiciones de número de inducción bajo ( $B \ll 1$ ) en un medio homogéneo y estratificado, las corrientes inducidas en el subsuelo son horizontales y no influyentes entre sí y la profundidad de exploración es independiente de la conductividad aparente (Callegary *et al.*, 2007). Por lo tanto, la profundidad de investigación está dominada por los parámetros geométricos del sistema de adquisición; es decir, el tipo de arreglo, la altura del instrumento y la distancia de separación entre bobinas.

La función de sensibilidad  $\varphi(Z)$  establece la contribución relativa de las corrientes inducidas en el medio al campo secundario a una determinada profundidad. Integrando esta función se tiene la función de respuesta acumulativa  $R(Z)$  la cual representa la fracción de campo secundario registrado en el receptor que se origina entre una profundidad  $Z$  y el infinito.  $R(Z)$  es una medida de la distribución de la sensibilidad del instrumento a profundidad que está definida por aproximaciones asintóticas de las ecuaciones de Maxwell en medios homogéneos (McNeill, 1980).

La variable  $Z$  es la profundidad de exploración normalizada con la separación entre bobinas para facilitar la comparación entre instrumentos.

En la figura 5.5 se muestra el comportamiento de la función de sensibilidad relativa y la función acumulativa para los arreglos de bobinas coplanares verticales y horizontales.

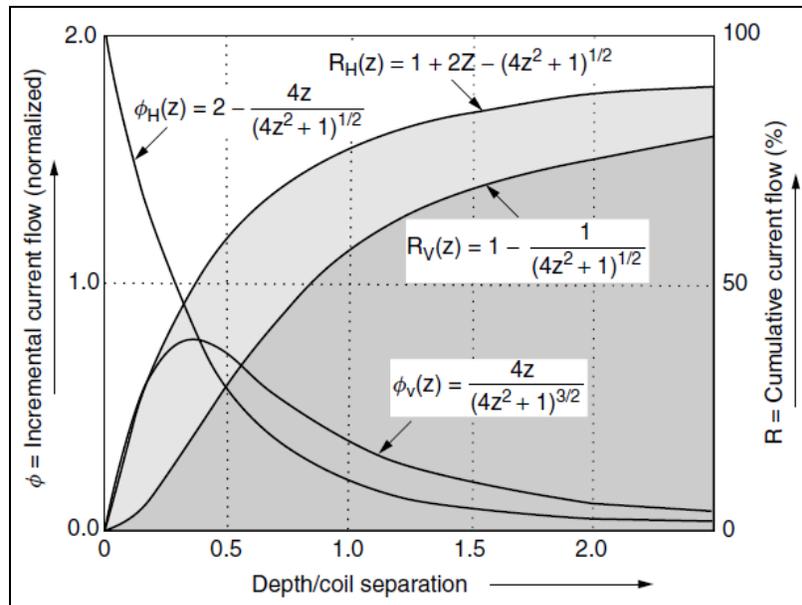


Figura 5.5 Función de sensibilidad  $\phi(Z)$  y función acumulativa  $R(Z)$  de los arreglos coplanares vertical y horizontal (Milsom, 2003).

Tomando como referencia los estudios de McNeill (1980), Callegary *et al.* (2007), Saey *et al.* (2011, 2012), Smedt *et al.* (2012) y Sudduth *et al.* (2012) los cuales definen la profundidad de exploración como la profundidad a la cual se contiene el 70% de la respuesta acumulativa ( $R(Z) = 30\%$ ) se pudo definir la profundidad de investigación de ambas modalidades implementadas en este trabajo. Sin embargo, existen otras técnicas para estimar la profundidad de exploración basadas en modelos numéricos de inversión de las relaciones conductividad-profundidad o a partir de formulas empíricas considerando medios estratificados (e.g. Butler, 2005; Huang, 2005; Robledo y Martinelli, 2011).

Finalmente, despejando la variable  $Z=d_e/s$  de las ecuación que define la respuesta acumulativa del arreglo horizontal mostradas en la figura anterior y con el cual se trabajó durante la adquisición en campo, se estimó una profundidad de exploración de 3.0 metros para la configuración CMD-2 y 5.9 metros para la configuración CMD-4.

## 6. CONCLUSIONES

El área de estudio y las poblaciones aledañas al poblado de San Antonio Tecómitl se encuentran sobre una región sometida a deformaciones verticales cuya distribución es producto principalmente de los esfuerzos que inciden sobre el terreno como consecuencia de la extracción del agua subterránea y la geología.

La aparición de una grieta somera en el área de estudio debe su origen a la pérdida de cohesividad del subsuelo a causa de la erosión por fuerzas de infiltración del agua, cuyo flujo está influenciado por la geología, topografía, variaciones estacionales y características estructurales asociadas a la subsidencia y actividad sísmica.

Con ayuda de los mapas elaborados a partir de los datos adquiridos con el sistema de inducción electromagnética fue posible detectar una estructura resistiva asociada a la grieta superficial (3 a <6m) así como la distribución espacial de zonas vulnerables a presentar los mismos fenómenos.

El método electromagnético implementado para conocer la distribución superficial de las propiedades eléctricas del subsuelo radica su eficiencia, a comparación de otras técnicas, en la gran cantidad de datos que es capaz de adquirir fácilmente en relativamente poco tiempo, así como el procesamiento sencillo de los mismos y presentarlos en mapas de buena resolución lateral que facilitan su interpretación.

Se recomienda planificar el monitoreo geofísico del área de estudio y zonas aledañas como medida de prevención para evitar accidentes en viviendas y calles y para programar acciones oportunas de remediación en caso de recurrencia. Para ello, se requerirá de la integración de la información que sea capaz de proporcionar otras técnicas de mayor resolución y que puedan servirse de este trabajo para hacer más eficiente su planificación.

Profundizar en la investigación sobre el uso del conductímetro de inducción; es decir, experimentar con tantas variables como el equipo lo permita, por ejemplo la altura del instrumento, el arreglo geométrico, la dirección del caminamiento y la

orientación del equipo con respecto a ésta, la forma de adquisición de manera continua a discreta, así como la elaboración de modelos de inversión 1D que permitan la construcción de mejores modelos.

Es importante realizar estudios a detalle sobre la geología somera del subsuelo e identificar las características litológicas, sedimentarias y estratigráficas que permitan una mejor interpretación y correlación de los datos observados; así también determinar los patrones de flujo locales y estudios de hidrogeología que proporcionen las bases para conceptualizar los efectos de la subsidencia a nivel local y regional.

Se recomienda evaluar constantemente la calidad del agua subterránea que se extrae de la zona, ya que presenta mayor probabilidad a contaminarse a través de las grietas del subsuelo.

Los problemas aunados a la sobreexplotación del recurso hídrico seguirán persistiendo mientras prosiga su extracción desmedida. Por los motivos expuestos se deben tomar otras acciones indirectas como campañas de concientización sobre el uso razonable del agua, tanto en escuelas como con la comunidad en general; incrementar el número de plantas de tratamiento de aguas residuales; mejorar los programas de conservación del suelo y áreas protegidas (donde se inicia el proceso de recarga que abastece al acuífero) así como los programas de salud/alimentación y planificación demográfica.

En conjunto con estas acciones, se debe exigir el cumplimiento de la ley y mejores políticas públicas por medio de la vigilancia y participación de la sociedad civil; así como revalorar nuestro entendimiento y relación con el medio ambiente y los recursos naturales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Pérez, L. A., Ortega-Guerrero M. A., Lugo-Hubp, J., Ortiz-Zamora, D. del C (2006). Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(3), 247-261.
- Álvarez-Manilla, A. A., Garnica A., P., Martínez-Peña, G. E. I. (2001). Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación técnica no. 172. México.
- Arango-Galván, C., Torre-González, B. De la, Chávez-Segura, R. E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E. (2011). Structural pattern of subsidence in an urban area of the southeastern Mexico Basin inferred from electrical resistivity tomography. *Geofísica Internacional*, 50(4), 401-409.
- Arce, J. L., Macías, R., García-Palomo, A., Capra, L., Macías, J. L., Layer, P., Rueda, H. (2008). Late Pleistocene flank collapse of Zempoala volcano (Central Mexico) and the role of fault reactivation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 944-958.
- Arroyo, D., Ordaz, M., Ovando-Shelley, E., Guasch, J. C., Lermo, J., Perez, C., Alcantara, L., Ramírez-Centeno, M. S. (2013) Evaluation of the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City produced by ground subsidence through the use of site amplification factors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 54-66.
- Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H. (2008). A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*, 100, 69-81.
- Bauer, P., Supper, R., Zimmermann, S. Kinzelbach, W. (2006). Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 126-141.
- Beamish, D. (2011). Low induction number, ground conductivity meters: A correction procedure in the absence of magnetic effects. *Journal of Applied Geophysics*, 75, 244-253.
- Bongiovanni, M. V., Bonomo, N., De la Vega, M., Martino, L., Osella, A. (2008). Rapid evaluation of multifrequency EMI data to characterize buried structures at a historical Jesuit Mission in Argentina. *Journal of Applied Geophysics*, 64, 37-46.

- Bonomo, N., Osella, A., Martinelli, P., de la Vega, M., Cocco, G., Letieri, F., Frittegotto, G. (2012). Location and characterization of Sancti Spiritus Fort from geophysical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 57-64.
- Brosten, T. R., Day-Lewis, F. D., Schultz, G. M., Curtis, G. P., Lane Jr., J. W. (2011). Inversion of multi-frequency electromagnetic induction data for 3D characterization of hydraulic conductivity. *Journal of Applied Geophysics*, 73, 323-335.
- Budhu, M., Shelke, A. (2008). The formation of earth fissure due to groundwater decline. 12<sup>th</sup> International conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. India. 3051-3059.
- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., Carande, R. E. (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11-12), 1556-1566.
- Callegary, J. B., Ferré, T., P., A., Groom, R. W. (2007). Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction instruments. *Vadose Zone Journal*, 6, 158-167.
- Campos-Enríquez, J. O., Delgado-Rodríguez, O., Chávez-Segura, R., Gómez-Contreras, P., Flores-Márquez, E. L., Birch, F. S. (1997). The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data. *Geophysics*, 62(1), 23-35.
- Carreón-Freyre, D. C., Cerca, M., Hernández-Marín, M. (2003). Correlation of near-surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, 53, 121-136.
- Carreón-Freyre, D. C., Hidalgo-Moreno, C. M., Hernández-Marín, M. (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación deferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 237-250.
- Carreón-Freyre, D. and Cerca, M. (2006). Integration of geological properties in the study of the subsidence and fracturing phenomena in two urban areas of Mexico. 10<sup>th</sup> International Association of Engineering Geology Congress. Nottingham, United Kingdom.
- Carreón-Freyre, D. C. (2011). Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Reporte técnico. Academia de Ingeniería A. C. Ciudad de México.

- Cheng, D. K. (1997). Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. Addison Wesley Iberoamericana S.A. México.
- Comisión Nacional del Agua (2009). Estadísticas del agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Edición 2009. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Comisión Nacional del Agua (2012). Atlas del Agua en México 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Comisión Nacional del Agua (2011) Estadísticas del agua en México, edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Gobierno del Distrito Federal (2002). Diagnóstico Geológico y Geohidrológico preliminar de la Microcuenca del Río Magdalena. Secretaría del Medio Ambiente, Mexico.
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura, 6(2), 111-130.
- Edminister, J. A. (1993) Schaum's outline of theory and problems of electromagnetics. Segunda edición. McGraw-Hill. Estados Unidos.
- Enciso-De la Vega, S. (1992). Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la Cuenca de México. Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 10(1), 26-36.
- Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier Science Ltd. Estados Unidos, p. 450.
- Frischknecht, F. C., Labson, V. F., Spies, B. R., Anderson, W. L. (2006). Profiling methods using small sources. De: Nabighian, M. N. Electromagnetic methods in applied geophysics (Investigations in geophysics; v.3). Society of Exploration Geophysics, Tercera edición, Estados Unidos de América.
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(1), 158-178.
- González-Morán, T., Rodríguez, R., Cortes, S. A. (1999). The Basin of Mexico and its metropolitan area: water abstraction and related environmental problems. Journal of South America Earth Sciences, 12, 607-613.
- Hanenberg, W. C., Reynolds C. B., Reynolds, I. B. (1991). Geophysical characterization of soil deformation associated with earth fissures near San Marcial and Deming, New Mexico. Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence, 200.

- Hernández-Marín, M., Burbey, T. J. (2012). Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow. *Journal of Hydrology*, 428-429, 80-93.
- Holzer, T. L., Pampeyan, E. H. (1981). Earth fissures and localized differential subsidence. *Water Resources Research*, 17(1), 223-227.
- Holzer, T. L., Galloway, D. L. (2005). Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 16, 87-99.
- Huang, H., Won, I. J. (2000). Conductivity and susceptibility mapping using broadband electromagnetic sensors. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 5(4). 31-41.
- Huang, H. (2005). Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors. *Geophysics*, 70(6), 135-142.
- Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín.Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J., Martínez-Reyes, J. (2011). Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and neotectonic regime. *Geofísica Internacional*, 50(3), 255-270.
- Jachens, R.C., Holzer, T. L. (1979). Geophysical investigations of ground failure related to ground-water withdrawal, Picacho Basin, Arizona. *Ground Water*, 17(6), 574-585.
- Jachens, R.C., Holzer, T. L. (1982). Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 998-1012.
- Lesser, J. M., Cortés, M. A. (1998). El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Ingeniería Hidráulica en México*, 13(3), 13-18.
- Li, X., Arroyo, V. (2011). Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrógrada a la inestabilidad de talud y erosión hídrica. *Revista Digital Universitaria, UNAM*, 12(2).
- López-Quiroz, P., Doin, M., Tupin, F., Briole, P., Nicolas, J. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69, 1-15.
- Lorrain, P., Corson, D. R., Lorrain, F. (1988). *Electromagnetic fields and waves*. Tercera edición. W. H. Freeman and Company. Estados Unidos.
- Lugo-Hubp, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A., Zamorano-Orozco, J. J. (1994). Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F., México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 43-52.

- Lugo-Hubp, J., Cordero-Estrada, M., Zamorano-Orozco, J. J. (1995). Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12(1), 52-67.
- Lugo-Hubp, J., Salinas-Montes, A. (1996). Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), 240-251.
- Marsal R.J., Mazari M., 1959, El subsuelo de la Ciudad de México. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F. 377 pp.
- Martinelli, H. P., Duplaá, M. C. (2008). Laterally filtered 1D inversions of small-loop, frequency-domain EMI data from a chemical waste site. *Geophysics*, 73(4), 143-149.
- Martinelli, H. P., Orsella, A. M. (2010). Small-loop electromagnetic induction for environmental studies at industrial plants. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7. 91-104.
- Martínez-Retama, S., Flores, C., Castillo-Gurrola, J. (2007). Saline intrusion in Guaymas Valley, Mexico from time-domain electromagnetic soundings. *Geofísica Internacional*, 46(3), 175-198.
- McNeill, J. D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. Technical Note TN-6, Geonics Limited.
- McNeill, J. D. (1991). Advances in electromagnetic methods for groundwater studies. *Geoexploration*, 27, 65-80.
- Meju, M. A., Fenning, P. J., Hawkins T. R. W. (2000). Evaluation of small-loop transient electromagnetic soundings to locate the Sherwood Sandstone aquifer and confining formations at well sites in the Vale of York, England. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 217-236.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics (The geological field guide series)*. Tercera edición. Editorial Wiley. Inglaterra. pp 232.
- Monteiro-Santos, F. A., Mateus, A., Figueiras, J., Gonçalves, M. A. (2006). Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF-EM method – A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 115-125.
- Mora-Chaparro, J. C. (2011). Atlas de riesgos naturales de la delegación Milpa Alta 2011. Secretaria de Desarrollo Social. Reporte técnico. México, Distrito Federal.

- Morris, E. R. (2009). Height-above-ground effects on penetration depth and response of electromagnetic induction soil conductivity meters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 150-156.
- Orellana, E. (1974). *Prospección Geoeléctrica (campos variables)*. Paraninfo, España.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Dávalos-Elizondo, M. G. (2008). On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans-Mexican Volcanic Belt and its fore-arc region, southern and central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(2), 346-364.
- Ortiz-Zamora, D. del C. *Fracturamiento en el acuitardo lacustre que cubre al acuífero regional de la Ciudad de México: origen, dinámica e implicaciones*. Director: Marcos Adrián Ortega Guerrero. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Aguas Subterráneas. México.
- Osmanoglu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 1-12.
- Ovando-Shelley, E., Romo, M. P., Contreras, N., Giralt, A. (2003). Effects on soil properties on future settlements in downtown Mexico City due to ground water extraction. *Geofísica Internacional*, 42(2), 185-204.
- Ovando-Shelley, E., Ossa A., Romo, M. P. (2007). The sinking of Mexico City: its effects on soil properties and seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 333-343.
- Pacheco-Martínez, J. *Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. Director: Jorge Arturo Arzate Flores. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra. México, 2007.
- Pacheco-Martínez, J., Arzate-Flores, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 84, 143-160.
- Pacheco-Martínez, J., Arzate-Flores, J. (2007). Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 389-402.

- Pellerin, L., Wannamaker, P. E. (2005). Multi-dimensional electromagnetic modeling and inversion with application to near-surface earth investigations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 71-102.
- Protección Civil Milpa Alta (2012). Hundimientos, grietas y sismicidad en el poblado de San Antonio Tecómitl. Reporte técnico. Jefatura Delegacional Milpa Alta 2012-2015. Dirección General Jurídico y de Gobierno. Subdirección de Protección Civil.
- Rao, S. M. (1996). Role of apparent cohesion in the stability of Dominican allophane soil slopes. *Engineering Geology*, 43, 265-279.
- Reitz, J. R., Milford, F. J., Christy, R. W. (1986). *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Cuarta edición. Addison-Wesley Iberoamericana. México.
- Robledo, F. E., Martinelli, H. P., 2011. Caracterización de zonas contaminadas por derrames recientes de hidrocarburos mediante métodos geofísicos. *Geoacta*, 36, 129-150.
- Robledo, F. E., Martinelli, H. P., Bonomo, N. E. (2011). Effects of instruments orientation on small-loop electromagnetic induction surveys of localized 2D conductive targets. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8, 579-591.
- Rodríguez C, R., Ochoa A., C. (1989). Estudio geoelectrico del sistema acuifero de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 191-205.
- Rojas, E., Arzate-Flores, J., Arroyo, M. (2002). A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. *Engineering Geology*, 65, 245-260.
- Sandoval, J. P., Bartlett, S. R. (1991). Land subsidence and earth fissuring on the Central Arizona Project, Arizona. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence*, 200.
- Saey, T., Van Meirvenne, M., Smedt, P., Cockx, L., Meerschman, E., Islam, M. M., Meeuws, F. (2011). Mapping depth-to-clay using fitted multiple depth response curves of a proximal EMI sensor. *Geoderma*, 162, 151-158.
- Saey, T., Smedt, P., Islam, M. M., Meerschman, E., Van De Vijver, E., Lehouck, A., Van Meirvenne, M. (2012). Depth slicing of multi-receiver EMI measurements to enhance the delineation of contrasting subsoil features. *Geoderma*, 189-190, 514-521.
- Sheng, Z., Helm, D. C. (1995). Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence*, 234.

- Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Nakamura-Labastida, E., Mejía-Aguilar, A. (2003). Oil pollution detection using resistivity sounding. *Geofísica Internacional*, 42(4), 613-622.
- Simpson, D. (2009). *Geoarchaeological prospection with multi-coil electromagnetic induction sensors*. Tesis doctoral. Universidad Ghent.
- Smedt, P., Saey, T., Lehouck, A., Stichebaut, B., Meerschman, E., Islam, M. M., Van De Vijver, E., Van Meirvenne, M. (2012). Exploring the potential of multi-receiver EMI survey for geoarchaeological prospection: A 90 ha dataset. *Geoderma*.
- Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Kitchen, N. R. (2001). Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31, 239-264.
- Sudduth, K.A., Myers, D. B., Kitcehn, N. R., Drummond, S. T. (2012). Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors, *Geoderma*. (Article In Press).
- Suski, B., Brocard, G., Authemayou, C., Consenza-Mullares, B., Teyssier, C., Holliger, K. (2010). Localization and characterization of an active fault in an urbanized area in central Guatemala by means of geoelectrical imaging. *Tectonophysics*, 480, 88-98.
- Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2).
- Wangsness, R. K. (1983) *Campos Electromagnéticos*. Editorial Limusa. México.