

*A las personas que me han compartido su amor y  
amistad sincera, en especial a mis padres, a mis  
hermanos y a mi mejor amigo y pareja.*

*A la vida misma por enseñarme que es efímera,  
maravillosa y un desafío constante.*

*Orgullosa de presentar este trabajo te lo dedico a ti.*

## **Agradecimientos**

A mi familia, por darme su amor y comprensión, a mis padres María Teresa Lara Álvarez y Juan Mario Zúñiga Barragán, en especial a mi mamá, por ser la fortaleza que impulsa mi vida, que me alienta a seguir adelante y me ha levantado en los momentos más difíciles. A ustedes hermanos Ariadna y Juan Mario por darme lecciones invaluable que un día no muy lejano entenderán.

A Francisco Arellano “simplemente” por compartir tu vida conmigo, al crecer y disfrutar cada día, teniendo en común la búsqueda del aprendizaje constante.

A ti que eres mi amiga(o) de la infancia, de la Universidad, que me has apoyado y hecho sonreír en el momento adecuado, que has formado parte de mi familia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, por brindarme la oportunidad de aprender y crecer en sus recintos.

Al Departamento de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica, por darme la pauta para emprender el camino en mi vida profesional.

En especial a mis profesores y amigos, con los que aprendí tanto académica como personalmente: M. en C. Gerardo Cifuentes Nava, Dr. René Chávez Segura, M. en C. Esteban Hernández Quintero y el Dr. Andrés Tejero Andrade.

Les agradezco por sus conocimientos, tiempo, apoyo, recomendaciones y por el hecho de transmitirme una visión integral para el desarrollo de proyectos. Además de la oportunidad llevar este trabajo más allá de nuestras fronteras. Me siento orgullosa de formar parte de su equipo. Sin olvidar al Ing. Alejandro García, M. en C. Guillermo Chávez y a la Ing. Aidé Esmeralda López.

Al Departamento de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería y a la plantilla de profesores por su enseñanza a lo largo de mi formación universitaria.

**Rocio Zúñiga Lara**

*Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.*

A la dependencia del Gobierno de Guatemala EMPAGUA (Empresa Municipal de Aguas de Guatemala), por las facilidades prestadas en particular a la Ing. Alicia Monzón (Directora de Sistemas de Drenaje) así como al personal de esta institución.

A la Policía Municipal y al personal de la Embajada de México en Guatemala durante la realización de este trabajo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT para la realización de este trabajo de tesis, a través del proyecto I-843.

Por brindarme su tiempo, atención y consejos en momentos claves de mi vida al Ing. Marco Flores y a la Dra. Gabriela Obregón.

A los integrantes del jurado por su atención y evaluación del trabajo en cuestión: Dr. Andrés Tejero Andrade, M. en C. Gerardo Cifuentes Nava, Dr. René Chávez Segura, Ing. Francisco A. Arroyo Carrasco y al Dr. José A. Hernández Espriú.

Y a todos aquellos que hicieron posible este trabajo desde el proceso hasta su culminación.

## ***Gracias***

***“Por mi raza hablará el espíritu”***

## ÍNDICE

	Página
<b>ÍNDICE</b>	iv
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	vi
<b>ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS</b>	ix
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b>	iix
<b>RESUMEN</b>	x
<b>INTRODUCCIÓN</b>	xii
<b>1. MARCO DE REFERENCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	1
1.1 Ubicación geográfica de Guatemala	1
1.2 Geología Regional de Guatemala	2
1.3 Estructura del Valle de Guatemala	4
1.4 Geología Local del Valle de Guatemala	7
1.6 Generación de colapsos. Mecanismos de formación.	12
<b>2. MARCO TEÓRICO. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA</b>	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Método Tomografía Eléctrica. Generalidades.	16
2.3 Fundamentos teóricos del método	18
2.3.1 Método de resistividad eléctrica.	18
2.3.2 Fuente puntual en un semiespacio. Funciones de Green	19
2.4 Factor geométrico y Resistividad aparente	23
2.5 Resistividad eléctrica del subsuelo	25
2.6 Profundidad de Investigación	26
2.7 Dispositivos electródicos lineales	27

2.7.1 Wenner	27
2.7.2 Wenner-Schlumberger	28
2.7.3 Dipolo- Dipolo	28
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>30</b>
3.1. Adquisición	30
3.2 Técnica Roll-along o de traslape	34
<b>4. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE TEORÍA DE INVERSIÓN 2D</b>	<b>37</b>
4.1 Modelo Directo	38
4.2 Modelo Inverso	39
4.3 Criterios de Convergencia	43
4.4. Procesado de datos de resistividad.	44
4.4.1 Formato de entrada .URF	44
4.4.2 Configuración del Modelo Directo	46
4.4.3 Configuración del Modelo Inverso	47
<b>5. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Comparación de los arreglos electródicos	49
5.2 Análisis de Perfiles. Arreglo electródico WS	54
5.2.1 Perfil 2A	55
5.2.2 Perfil 1A	57
5.2.3 Perfil A, B y C	61
5.2.4 Perfil D-E	61
5.2.5 Perfil D-E en secciones	64
5.3 Análisis del hundimiento 2010	67
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>70</b>

<b>APÉNDICE A</b>	73
<b>APÉNDICE B</b>	79
<b>REFERENCIAS</b>	80

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 0.1. Esquema conceptual de los hundimientos ocurridos en la Cd. de Guatemala. ...xii	
Figura 1.1. Guatemala, ubicación geográfica. Tomada de <a href="http://www.Geology.com">www.Geology.com</a> , 2010) ..... 1	1
Figura 1.2. Provincias geológicas. Modificado de Bonis (1969); Escribà (1996)..... 2	2
Figura 1.3. Mapa geológico que muestra la litología de Guatemala (Modificado de USGS, 2000)..... 3	3
Figura 1.4. Representación de los volcanes más importantes de Guatemala (Topinka, 1996). ..... 4	4
Figura 1.5. (a) Modelo geológico de un graben, definido por fallas múltiples. (b) Esquema. Morfología del Valle de la Ciudad de Guatemala. Modificado de Monzón, 2003. .... 5	5
Figura 1.6. Modelo tectónico que interpreta la estructura del valle de Guatemala, mediante un <i>pull apart basin</i> , limitado al oeste por la falla de Mixco. (Bonis, 1993; Pérez, 2009)..... 6	6
Figura 1.7. (a) Mapa de fracturas provocadas por el terremoto de 1976 en el valle de Guatemala. Los sectores en los que no se presentan fracturas coinciden con el cerro El Naranja y el sector Este de la ciudad. Nótese la estrella indicando la localidad de El Trébol. (b) Sección transversal esquemática del valle de la ciudad de Guatemala con orientación E- W. En esta sección se puede observar que al W el valle está atravesado por el sistema de fallas de Mixco, mientras que en el E se encuentra el depósito de colada del volcán de Pínula (SGG, 1976; Pérez, 2009). .... 7	7
Figura 1.9. Correlación estratigráfica de las columnas de colapso Zona 2 (2010) y colapso Zona 6 (2007). <i>FPC es flujo de pómez y ceniza</i> (Tomado de Zamudio <i>et al</i> , 2010). .... 8	8
Figura 1.10. Diagrama esquemático de la formación de hundimientos por colapso y su relación con arroyos y corrientes subterráneas, en el Distrito de Taupo, Nueva Zelanda. Tomado de Manville y Reeves (2006). .... 13	13
Figura 2.0 Representación simplificada de la técnica de Tomografía Eléctrica para un arreglo dipolo-dipolo. (Chávez <i>et al</i> , 2011) ..... 17	17
Figura 2.1. Principio del método resistivo, dispositivo electrónico lineal (cuadripolo)..... 18	18

Figura 2.2. Fuente puntual de corriente en la superficie de un medio homogéneo. ....	20
Figura 2.3. Arreglo eléctrico de dos electrodos de potencial y dos electrodos de corriente. Tomado de Orellana, 1982. ....	23
Figura 3.1. Localización de los Perfiles de TRE, en las Zona 2 y 6 de la Ciudad de Guatemala. Modificada de Google Earth (2010).....	30
Figura 3.2. Mapa local de la zona de estudio. Tomado de Chávez et al, 2011. ....	31
(a) Perforación en el pavimento para que el electrodo se asiente en el suelo natural. (b) Se coloca una pequeña cantidad de sulfato de cobre y agua. (c) Se introduce el electrodo con la ayuda de u mazo asegurándose que quede fijo. (d) La parte del electrodo que sale a superficie, se conecta al cable inteligente que a su vez está conectado al equipo.....	31
Figura 3.4. Tomografía eléctrica, (e) Esquema de adquisición con el equipo SYSCAL Pro Swich. ....	32
Figura 3.5. Programación de la secuencia de medición. (Electre Pro, 2007).....	33
Figura 3.6. Esquema de un dispositivo multi-electrodo utilizando la técnica de Roll-along, * y ° representan los electrodos, donde * son los electrodos de traslape, los que se colocan para medir el siguiente segmento del perfil.....	35
La sección a color muestra el primer traslape y la flecha la posición del equipo SYSCAL	36
Figura 4.1. Arreglo de bloques rectangulares utilizado en el modelo 2D (Loke y Barker, 1996).....	39
Figura 5.1. Perfil 1A, comparación entre los arreglos WW, WS y DD. Los La escala de valores de la resistividad calculada [ $\Omega$ .m] es logarítmica. ....	53
Figura 5.2. TRE del Perfil 2A. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). El círculos en rojo muestra la posición aproximada del rasgo C1 .....	56
Figura 5.3 Exploración de la cavidad C2 determinada mediante el estudio de Tomografía Eléctrica del Perfil 1A (Figura 5.4). Se pueden observar algunas fisuras, zonas de humedad y depósitos de material producto de la caída de la parte superior de este rasgo que se amontonan en el suelo (A). Nótese el tamaño de las personas en relación a las dimensiones de esta cavidad (B). ....	57

Figura 5.4. TRE de los Perfiles de 1A y A. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). El círculo en rojo muestra ubicación de la cavidad C2.....	59
Figura 5.5. TRE de los Perfiles A, B y C. En orden descendente: mapa de ubicación (modificado de EMPAGUA (2010)) y resultado de inversión.....	60
Figura 5.6. TRE del Perfil D-E, sección completa. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). Los círculos en rojo muestran las zonas de riesgo a lo largo del perfil D-E.....	63
Figura 5.7. TRE del perfil D-E por secciones, técnica utilizada roll-along. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). .....	66
Figura 5.8. Algunas causas de colapsos debido a los conductos de tuberías: (A) compactación inadecuada debido a la presencia de cuellos de corte, (B) compactación inadecuada del material alrededor de la tubería, (C) Agrietamiento en el suelo o roca muy erosionada en los lados de la trinchera, (D) Grietas por asentamiento diferencial, (E) presencia de ondulaciones o rugosidad en la superficie de los collares de corte. (Fell <i>et al.</i> , 2004).....	67
Figura 5.9. Hundimiento de 2010. Fotografía tomada a 48 m de profundidad. Muestra la presencia de tubificaciones y el estado del Colector de drenaje Poniente.....	68
Figura A.1. Perfil 2A comparación de la configuración electrónica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD) .....	73
Figura A.2. Perfil 1A comparación de la configuración electrónica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD). .....	74
Figura A.3. Perfil A comparación de la configuración electrónica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD). .....	75
Figura A.4. Perfil B comparación de la configuración electrónica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD). .....	76
Figura A.5. Perfil C comparación de la configuración electrónica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD). .....	77

Figura A.6. Perfil DE comparación de la configuración electródica, en orden descendente Wenner (WW), Wenner-Schlumberger (WS) y Dipolo-Dipolo (DD). ..... 78

## **ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS**

Cuadro 1.1. Descripción geológica de las unidades principales de la Cd. de Guatemala. Modificado de Koch & Mc Lean (1975); Zamudio *et al* (2010). ..... 10

Tabla 2.1. Resistividades de materiales geológicos y residuos. Modificada de Gasulla (1999). ..... 25

Cuadro 2.1. Características principales de los dispositivos electródicos lineales, Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo ..... 29

Cuadro 3.1. Características adquisición de los perfiles propuestos en la TRE. .... 34

Cuadro 3.2. Características de las secciones del Perfil DE con la técnica roll-along. .... 36

Tabla 5.1. Valores de los criterios de convergencia obtenidos para cada arreglo en el Perfil 1A ..... 51

Tabla 5.2 Tipos de Subsistencia. Tomado de Tomás et al (2009) ..... 54

## **ÍNDICE DE GRÁFICAS**

Gráfica 5.1. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo -Dipolo; Polo-Dipolo; Polo-Polo; Wenner y Wenner-Schlumberger obtenidas para una separación electródica de 5 metros y distintos niveles de medición (Edwards 1977). ..... 50

Gráficas 5.2. Obtenidas con el software Earth Imager 2D del perfil 1A, (a) Gráfica de correlación de dato calculado al dato medido, (b) Gráfica de la curva de convergencia. .... 51