



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Estudio de las fallas activas al norte del  
municipio de San Luis Potosí, mediante técnicas  
de fotogrametría y métodos de tomografía  
eléctrica.**

Tesis que presenta  
**Dafne Mota Navarro**

Para obtener el grado de  
**Maestra en Geociencias Aplicadas**

Codirectores de la Tesis:  
Dr. José Alfredo Ramos Leal  
Dr. Sócrates Figueroa Miranda

**San Luis Potosí, S.L.P., Junio de 2024**



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Estudio de las fallas activas al norte del municipio de San Luis Potosí, mediante técnicas de fotogrametría y métodos de tomografía eléctrica**” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Dafne Mota Navarro** y aprobada el **día de mes de año** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Codirector de la tesis

---

**Dr. Sócrates Figueroa Miranda**  
Codirector de la tesis

---

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Rubén López Doncel**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección del **Dr. José Alfredo Ramos Leal** y el **Dr. Sócrates Figueroa Miranda**.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**201314**) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Al Laboratorio de Geofísica y el Laboratorio de Geomática del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT).

Página en Blanco que se va a utilizar para colocar la copia del acta de examen.

## Dedicatorias

A mi **Familia**,

Por su amor, por su confianza y apoyo en todo momento para poder concluir con esta etapa profesional.

A mi tía la **Dra. Lizy**,

Porque sin ella yo no habría estado aquí, por su invaluable apoyo.

*“De la vida no quiero mucho. Quiero apenas saber que intenté todo lo que quise, tuve todo lo que pude, amé lo que valía la pena y perdí lo que nunca fue mío.”*

Pablo Neruda

## Agradecimientos

A través de este breve texto quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que me apoyaron moral, científicamente y colaboraron de diferentes maneras para la finalización de este trabajo de investigación, por lo que agradezco a:

El IPICyT y su personal de posgrado administrativo, académico, de comunicación social, servicios generales y de mantenimiento, por todas las atenciones brindadas en el proceso como estudiante de esta institución.

A mis Codirectores el Dr. José Alfredo Ramos Leal y al Dr. Sócrates Figueroa Miranda de manera muy especial por haber aceptado dirigir este proyecto en conjunto, por las discusiones críticas en el desarrollo de este trabajo, por compartirme sus conocimientos, ideas y confianza para lograr consolidar esta investigación. A mis sinodales el Dr. José Tuxpan Vargas y al Dr. Rubén López Doncel por la practicidad y bondad con la que comparten su sabiduría, críticas y sugerencias que ayudaron a enriquecer este proyecto.

A los técnicos de los laboratorios de Geomática y Geofísica, el Dr. Fermín Villalpando Tovalín y al Mtro. David Ernesto Torres (respectivamente) por su disponibilidad y apoyo en el análisis de los datos obtenidos para este proyecto.

A los maestros de la UASLP, Marco Antonio Rojas y Alfredo Aguillón Robles por el apoyo incondicional para seguir con mis estudios y trabajo.

A la Coordinación Estatal de Protección Civil de San Luis Potosí, por su apoyo y comprensión, sobre todo por parte César Rocha, Julián Zarate, Ignacio Antonio y Consuelo. Y a Iván Luna de Aguascalientes por el apoyo.

A mis amigos por su invaluable amistad y contribución directa o indirectamente en el proceso de la maestría y tesis: Daniel Galarza, Eduardo Monreal, Anzhony Palomares, Helios Bafun, Diana Ramírez y Diego Berino; así como los que siempre están, aún a kilómetros de distancia, Fer y Trujis, mil gracias.

A mis compañeras y compañero de maestría, Carolina, Paola, Mónica, Melissa, Gaby y Federico, gracias por su amistad, risas, salidas, y apoyo aún con la crisis existencial que a todos nos dio durante este proceso, así como a Emily Balderas.

A César Ramírez Llanas por ser el compañero idóneo en esta etapa de mi vida.

A mis padres y mi hermana por ser siempre mi motor para continuar en mi preparación profesional y académica, y a toda mi familia por ser siempre ese refugio donde encuentro paz y tranquilidad.

¡Muchas gracias!

# Contenido

Constancia de aprobación de la tesis .....	ii
Créditos Institucionales .....	iii
Dedicatorias .....	iv
Agradecimientos .....	vi
Lista de Tablas .....	ix
Lista de Figuras .....	x
Resumen .....	xiii
Abstract.....	xiv
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis.....	3
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General. ....	3
1.3.2 Objetivos Particulares .....	3
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1 Fallas.....	4
2.2 Google Earth .....	8
2.3 Fotogrametría.....	9
2.3.1 Drones.....	9
2.3.2 Fotogrametría aérea .....	11
2.4 Métodos Geofísicos.....	12
2.4.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) .....	12
<b>CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
3.1 Localización y vías de comunicación .....	15
3.2 Geomorfología.....	17
3.3 Edafología .....	18
3.4 Hidrología .....	18
3.5 Clima .....	19
3.6 Vegetación .....	19
<b>CAPÍTULO IV. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>21</b>
4.1 Fisiografía.....	21
4.1.1 Provincias Fisiográficas.....	21

4.2 Tectónica.....	23
4.3 Litología.....	25
4.3.1 Cretácico Inferior.....	26
4.3.2 Cretácico Superior.....	26
4.3.3 Terciario.....	27
4.4 Hidrogeología.....	29
<b>CAPÍTULO V. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>32</b>
5.1 Materiales.....	32
5.1.1 Google Earth.....	32
5.1.2 Drones.....	32
5.1.3 Equipo Geofísico.....	33
5.2 Metodología.....	35
5.2.1 Etapa 1. Recopilación de información.....	35
5.2.2 Etapa 2. Identificación de fallas y aplicación de Google Earth.....	36
5.2.3 Etapa 3. Fotogrametría.....	38
5.2.4 Etapa 4. Geofísica.....	42
<b>CAPÍTULO VI. RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
6.1 Identificación de fallas.....	46
6.2 Aplicación de Fotogrametría.....	53
6.3 Resultado de Tomografías de Resistividad Eléctrica.....	54
6.3.1 Tomografía “González”.....	54
6.3.2 Tomografía “Buena Vista”.....	56
6.4 Mapeo de fallas.....	58
6.5 Afectaciones a la infraestructura y riesgo para la población.....	59
<b>CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>



## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Tabla de resistividades de diferentes materiales. ....	13
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones del acuífero del valle de Villa de Arista del año 1996 ..	18
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones del Dron utilizado para este trabajo de investigación ..	32
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones del resistivímetro SuperSting R8.....	33
<b>Tabla 5.</b> Parámetros del Proyecto de Vuelo.....	39
<b>Tabla 6.</b> Lista de fallas totales encontradas en la zona de estudio con sus principales características.....	47

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Principales tipos de fallas geológicas.....	4
<b>Figura 2.</b> Esquema representativo de horts y graben.....	5
<b>Figura 3.</b> Fallas de desplazamiento.....	5
<b>Figura 4.</b> Esquema de desplazamiento de transtensión y transpresión.....	6
<b>Figura 5.</b> Esquema de pull-apart y push-up.....	6
<b>Figura 6.</b> Esquema de fallamiento de relevo.....	7
<b>Figura 7.</b> Representación del uso de las imágenes históricas de Google Earth.....	9
<b>Figura 8.</b> Tipología de drones.....	10
<b>Figura 9.</b> Ejemplo de fotografías aéreas asociadas a un punto en el terreno.....	11
<b>Figura 10.</b> Ejemplo de una pseudosección de resistividad aparente obtenida con el método de dipolo-dipolo.....	14
<b>Figura 11.</b> Rangos típicos de resistividad eléctrica de algunos materiales.....	14
<b>Figura 12.</b> Mapa de vías de comunicación para llegar a la zona de estudio.....	16
<b>Figura 13.</b> Acercamiento de las vías de comunicación en la zona de estudio.....	16
<b>Figura 14.</b> Mapa geomorfológico de la zona de estudio.....	17
<b>Figura 15.</b> Mapa de provincias fisiográficas que se encuentran en la zona de estudio.....	21
<b>Figura 16.</b> Mapa de subprovincias fisiográficas.....	23
<b>Figura 17.</b> Imagen del Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y la zona de estudio.....	24
<b>Figura 18.</b> Mapa geológico de la zona de estudio.....	25
<b>Figura 19.</b> Esquema de pozos de la CNA del relleno aluvial y nivel estático y dinámico.....	28
<b>Figura 20.</b> Esquema de columna litológica.....	29
<b>Figura 21.</b> Zona de estudio en el acuífero de Villa de Arista.....	30
<b>Figura 22.</b> Plano del Valle de Villa de Arista.....	31
<b>Figura 23.</b> Imágenes ilustrativas del dron.....	33
<b>Figura 24.</b> Equipo SuperSting R8.....	34
<b>Figura 25.</b> Diagrama de etapas de la metodología.....	35

<b>Figura 26.</b> Mapa de ubicación de fallas basado en datos de Protección Civil Municipal de San Luis Potosí..	36
<b>Figura 27.</b> Fallas detectadas en campo a simple vista por visualización en Google Earth.	37
<b>Figura 28.</b> Acercamiento de las fallas.	37
<b>Figura 29.</b> Esquema de ejemplo del proceso de vuelo para cubrir la zona de estudio.	39
<b>Figura 30.</b> Proyecto de vuelo de la Falla “Bocas 1”.	40
<b>Figura 31.</b> Esquema de traslape de fotografías aéreas y su grado de coincidencia.	41
<b>Figura 32.</b> Modelo Digital de Superficie Dispersa (DSM).	41
<b>Figura 33.</b> Mapa de ubicación de tomografías realizadas en campo.	43
<b>Figura 34.</b> Localización de TRE 1, en las fallas “González”.	44
<b>Figura 35.</b> Localización de TRE 2, en la falla de “Buena Vista”	45
<b>Figura 36.</b> Imagen de ubicación de las fallas reportadas por Protección Civil Municipal de San Luis Potosí..	46
<b>Figura 37.</b> Diagrama de frecuencias de los lineamientos de las fallas de interés.	51
<b>Figura 38.</b> Mapa del cono de abatimiento..	52
<b>Figura 39.</b> Ortomosaico resultante de la falla “Bocas 1”.	53
<b>Figura 40.</b> Imagen de comparación..	53
<b>Figura 41.</b> Imagen diferencial de resolución..	54
<b>Figura 42.</b> Ubicación de la tomografía “González” con respecto a las fallas.	55
<b>Figura 43.</b> Tomografía “González”	56
<b>Figura 44.</b> Ubicación de la tomografía “Buena Vista” con respecto a las fallas.	56
<b>Figura 45.</b> Tomografía “Buena Vista”.	57
<b>Figura 46.</b> Mapa de fallas totales de la zona de estudio.	58
<b>Figura 47.</b> Evidencia de la deformación del pavimento	59
<b>Figura 48.</b> Evidencia fotográfica de la deformación del pavimento por la falla Buena Vista 1.	60
<b>Figura 49.</b> Esquema de las partes de una falla del terreno.	61
<b>Figura 50.</b> Representación de la generación de agrietamientos.	62

<b>Figura 51.</b> Daños por la aparición de fallas.....	63
<b>Figura 52.</b> Toma de fotografía aérea en la identificación de la falla “Bocas 1”. ....	64
<b>Figura 53.</b> Riesgo y daño por falla “Bocas 1”.....	65
<b>Figura 54.</b> Fotografía aérea de la falla 41 (Bocas 3).. ..	67
<b>Figura 55.</b> Fotografía de falla No. 41 de nombre “Bocas 3” .. ..	68
<b>Figura 56.</b> Seguimiento a la misma falla No. 41.....	68
<b>Figura 57.</b> Ultima parte de la falla “Bocas 3”.....	69
<b>Figura 58.</b> Fotografías de la falla No. 42 de nombre “La Morita”.....	70
<b>Figura 59.</b> Mapa con distancia considerada de peligro.....	72
<b>Figura 60.</b> Acercamiento a las fallas con el perímetro de seguridad de 30 m.....	73
<b>Figura 61.</b> Ejemplo de las fallas No. 26 y 27 (Tabla 6) y perímetro de 30 m considerado como zona de peligro.....	74
<b>Figura 62.</b> Acercamiento a las fallas 39, 40 y 41 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de 30 m de peligro.....	75
<b>Figura 63.</b> Acercamiento a las fallas 12 y 13 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de peligro de 30 m.....	76
<b>Figura 64.</b> Acercamiento a la falla No. 42 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de peligro de 30 m.....	77

## Resumen

El Estudio de las fallas activas al norte del municipio de San Luis Potosí, mediante técnicas de fotogrametría y métodos de tomografía eléctrica se realizó con el objetivo de comprender el origen de las discontinuidades existentes en el camino que conecta a la Delegación de Bocas con el municipio de Villa de Arista. Esto en base a lo que ha ocurrido en el mundo y en el país, ya que la aparición de fallas ha sido en la última década un de los fenómenos perturbadores geológicos más importantes para la sociedad, por los daños que se propagan en casa-habitación, así como en la infraestructura civil, llevando a cabo diferentes trabajos de investigación para conocer su origen, sus efectos, así como las acciones a tomar para reducir riesgos y peligros por la aparición de estas.

El propósito de este trabajo es principalmente la caracterización de las fallas presentes en la zona de estudio que abarca una parte de lo que se le conoce por diversos autores como el “graben de Arista-Ahualulco”. La realización de esta actividad se llevó a cabo a partir de diferentes herramientas, comenzando con el uso de imágenes ópticas tomadas del sistema de información geográfica, Google Earth, para la identificación de las fallas en el terreno de interés. Se identificaron 57 fallas como resultado de este trabajo de investigación, así como sus características, direcciones que van de NW-NE, llegando casi al N-S y longitudes variables para cada una de ellas. Con esta información se planeó el trabajo de campo con las visitas guiadas y análisis de fotogrametría aérea, mediante drones, y obtener imágenes aéreas de alta resolución para determinar diferentes características de las fallas del terreno.

Complementando el estudio se aplicó uno de los métodos geofísicos para obtener con mejor detalle la geología del terreno. En este caso en particular, se utilizó la tomografía eléctrica con las que se obtuvo la geología del terreno, se infirió dónde se encontraba el nivel freático y el comportamiento de las fallas con el agua existente en el subsuelo.

Todo ello para obtener un mejor entendimiento de estas fallas y poder realizar un estudio de peligro por la cercanía de estas discontinuidades con las construcciones, casas-habitación y zonas de agricultura que han sufrido daños por la aparición y existencia de las fallas en la zona.

**PALABRAS CLAVE:** Fallas, Google Earth, Drones, Tomografía Eléctrica, Mapa de Peligro.

## Abstract

The study of the active faults in the north of the municipality of San Luis Potosí, using photogrammetry techniques and methods of electric tomography was carried out with the aim of understanding the origin of the existing discontinuities on the road that connects the Bocas delegation with the municipality of Villa de Arista. This is based on what has happened in the world and in the country, since the appearance of faults has been in the last decade one of the most important geological disturbing phenomena for society, for the damage that spread in house-room, as well as in the civil infrastructure, carrying out different research works to know their origin, their effects, as well as the actions to take to reduce risks and dangers due to the appearance of these

The purpose of this work is mainly the characterization of the faults present in the study area that covers a part of what is known by various authors as the “Graben de Arista-Ahualulco”. The realization of this activity was carried out from different tools, starting with the use of optical images taken from the Geographic Information System, Google Earth, for the identification of faults in the field of interest. 57 faults were identified as a result of this research work, as well as their characteristics, directions ranging from NW-NE, reaching almost the N-S and variable lengths for each of them. With this information, fieldwork was planned with guided tours and analysis of aerial photogrammetry, using drones, and obtain high resolution aerial images to determine different characteristics of the faults of the terrain.

Complementing the study, one of the geophysical methods was applied to obtain in better detail the geology of the terrain. In this particular case, electrical tomography was used to obtain the geology of the terrain, inferred where the water table was and the behavior of the faults with the existing water in the subsoil.

All this to obtain a better understanding of these failures and to be able to carry out a hazard study due to the proximity of these discontinuities with the constructions, houses and agricultural areas that have suffered damage due to the appearance and existence of faults in the área.

KEY WORDS: Faults, Google Earth, Drones, Electrical Tomography, Hazard Map.

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

En todo el mundo se han producido una gran cantidad de desastres y catástrofes naturales, sin embargo, en las últimas décadas el aumento de daños causados por estos eventos, han sido provocados por el crecimiento de la población mundial y en específico en las zonas metropolitanas de todos los estados y países alrededor del mundo. Entre los riesgos existentes los más reconocidos son los de causa natural, es decir, los riesgos geológicos, como lo son: terremotos, erupciones volcánicas, hundimientos, movimiento de laderas, subsidencia del suelo, agrietamiento del terreno, etc., todos estos riesgos pueden tener una relación directa o indirecta con estructuras geológicas preexistentes, así como rasgos morfoestructurales que suelen ser fallas y fracturas; que a su vez estas estructuras pueden estar inactivas, activas o reactivadas, lo que causa daños económicos en cuanto a la infraestructura; así como, la posible pérdida de vidas humanas.

Existe en la actualidad un dramático aumento en las tasas de aparición de fallas y agrietamientos en diferentes estados del país, como lo son Michoacán, el Estado de México, Ciudad de México, Aguascalientes, Querétaro y en este caso particular de San Luis Potosí. Ya que al norte de la capital potosina han sido detectadas y estudiadas en menor cantidad estas estructuras, por lo que el reconocimiento de estos agrietamientos es de vital importancia, ya que existen consecuencias por la presencia de este fenómeno perturbador, como lo son daños a casas habitacionales, así como a la infraestructura civil, lo que representa un constante riesgo para toda la población.

Dentro de la geología el término *falla* se llega a definir como una fractura en la corteza terrestre, en la cual los bloques rocosos se mueven a lo largo y son separados; ligado a ello se encuentra la *fractura*, que se refiere a la separación de dos o más piezas de un cuerpo sólido bajo presión; un concepto apegado a esta descripción son los *agrietamientos*, sin embargo, una grieta se puede iniciar como consecuencia de esfuerzos de tensión importantes en cualquier condición del suelo (Auvinet, 2010; Auvinet et al., 2013a, 2013b, 2017, 2018). En el caso de un término más general se le pueden llamar *discontinuidades* que abarca los conceptos de fallas, fracturas o fisuras, ya que de igual forma ocurren cuando la superficie se rompe, presentando desplazamientos verticales u horizontales en algunos casos, de una manera más concisa es la interrupción dentro de una estructura uniforme de una roca u otro sólido. Un fenómeno asociado a estos conceptos es el *hundimiento*, que se describe como una cavidad subterránea o superficial, y pueden tener un origen natural o antrópico.

El presente trabajo se utilizará el término de *falla y/o fallamiento* ya que el objetivo es buscar el origen de estas estructuras y su efecto en la zona de estudio. La investigación se desarrolla en la Delegación de Bocas, del estado de San Luis Potosí, con dirección al municipio de Villa de Arista, dónde la presencia de fallas y

agrietamientos ha ido en aumento, ya que desde el 2013 se tiene registro de los primeros agrietamientos en aparecer en esta zona, para el año 2017 ya había nuevos estudios por la existencia de nuevas grietas, sin embargo, con el paso de los años se ha venido agravando este problema.

Para el caso de San Luis Potosí se tienen reportadas afectaciones por primera vez en el año de 1978 (Arzate *et al.*, 2006), sin embargo, en 1998 fueron documentados los primeros daños evidentes en colonias del centro, que fueron la Colonia Aeropuerto, Reyitos, San Ángel y Valle de los Cedros (Barboza Gudiño *et al.*, 2018), esto dio pauta a la realización de los primeros estudios técnicos, tanto geofísicos como geológicos en el año 2006 por Arzate *et al.*, dónde se tenía el objetivo de obtener las propiedades mecánicas, así como las características tectónicas, entre otros componentes que influyeron en la generación de esas discontinuidades y su relación con los hundimientos registrados, es entonces que se tuvo un registro de 22 fracturas, así como sus posibles factores genéticos, como lo son:

- Irregularidades en el basamento rocoso, que podrían controlar la geometría y la propagación del fracturamiento en la superficie.
- Descenso en el nivel piezométrico por la sobreexplotación de acuíferos, la cual controla la tasa de subsidencia en la zona.
- Presencia de paleocauces que podrían controlar el fracturamiento, como consecuencia de los antiguos drenajes del valle.

Algunos investigadores han bautizado una amplia zona que incluye esta área de estudio como Graben de Arista-Ahualulco, ya que se han realizado diferentes análisis a las características de este lugar, que parecen indicar que se trata de la parte final del Graben de Villa de Reyes hacia el noreste, es por ello que el presente análisis se realizará en lo que llamaremos el “Área de Fallas y Agrietamientos de Bocas-Arista” (AFABA), dónde se aplicaron diferentes métodos y técnicas de estudio, para definir el origen de estas estructuras morfoestructurales; así como, identificar la afectación que se presenta en las construcciones civiles dentro del área de estudio.

Debido a los objetivos de este trabajo, el enfoque principal es el uso y aplicación de la fotogrametría aérea (drones) y tomografía eléctrica para el análisis de fallas, sin embargo, en primera instancia se utilizó Google Earth para identificar el mayor número de agrietamientos en la zona de estudio y seleccionar los de mayor interés para aplicar fotogrametría, y con ella poder obtener información más detallada de las fallas seleccionadas, en conjunto con la aplicación de la tomografía eléctrica para conocer más a detalle la geología del subsuelo, el comportamiento de las grietas a mayor profundidad y con la identificación del nivel freático, teniendo como resultado un mayor conocimiento de la zona de estudio así como un mapa de peligro para la población que habita en la zona de interés.



## **1.2 Hipótesis**

Las fallas que se encuentran en la zona de estudio tienen un origen tectónico y son magnificadas por la actividad antropogénica debido a la sobreexplotación de los acuíferos.

## **1.3 Objetivos**

**1.3.1 Objetivo General:** Establecer el origen de las fallas activas en una porción del graben de Arista-Ahualulco mediante fotogrametría y tomografía eléctrica para la evaluación de peligro por fallas del terreno.

### **1.3.2 Objetivos Particulares:**

- Mapeo de las fallas activas mediante métodos activos y pasivos de percepción remota.
- Identificación y caracterización morfológica (distribución y arreglo) de las fallas activas del terreno de la zona de estudio.
- Caracterización de las fisuras mediante técnicas de fotogrametría.
- Análisis de las causas que generaron el fallamiento en la zona (presencia del cono de abatimiento, y tomografía).
- Diagnóstico de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio. (hidrología, cono de abatimiento de la zona, historia de hidrología en la zona).
- Mapa de peligro o peligrosidad por fallas del terreno.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Para fundamentar los objetivos de este estudio se debe tener una concepción de los términos que se manejan, así como su empleo en esta investigación, con el afán de tener una mejor comprensión en el ámbito de los fenómenos geológicos, en este caso específico de la aparición de fallas que ha ido en aumento por diferentes causas, desde su descripción más sencilla, hasta todo lo que abarca en sus principales características para llegar a los componentes más importantes que sean parte del análisis de este trabajo, tomando en cuenta cada uno de los métodos empleados, así como de sus propios instrumentos para el estudio de las grietas.

### 2.1 Fallas

Bates y Jackson (1980) describen de forma geológica que una *falla* se describe como una fractura o zona de fracturas a lo largo de la cual ha ocurrido un desplazamiento relativo entre dos bloques que son paralelos a la fractura. Es decir, que se trata de una discontinuidad en rocas y suelos, que se pueden producir cuando se supera la resistencia a fuerzas tectónicas de la Tierra, y/o por actividad antropogénica que ayude a que este fenómeno se propague.

Una de las clasificaciones de las fallas está en función del movimiento relativo de los bloques del echado del plano de falla; bajo este criterio existen cuatro tipos: falla normal, falla inversa, falla lateral y falla oblicua (Fossen, 2010) (Figura 1).

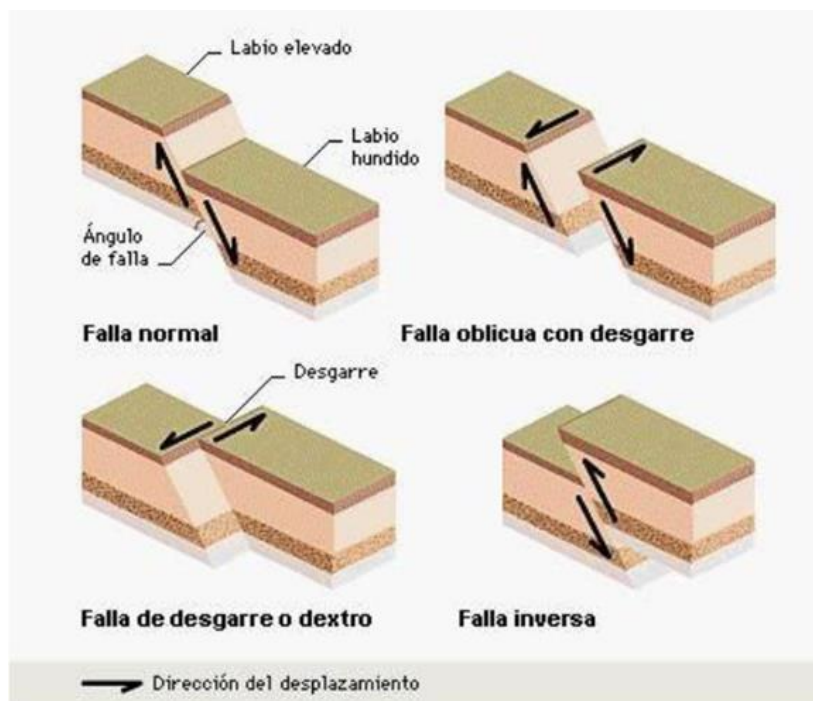
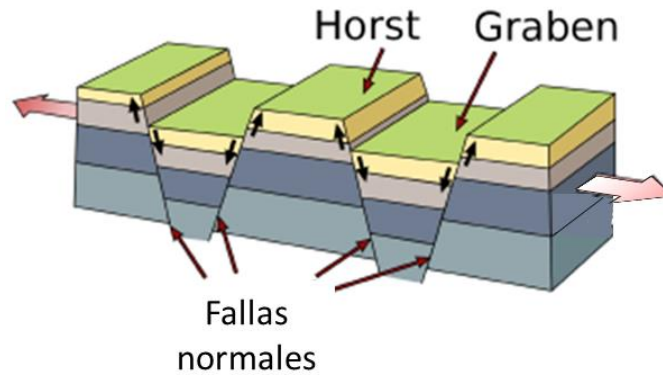


Figura 1. Principales tipos de fallas geológicas. (Fossen, 2010).

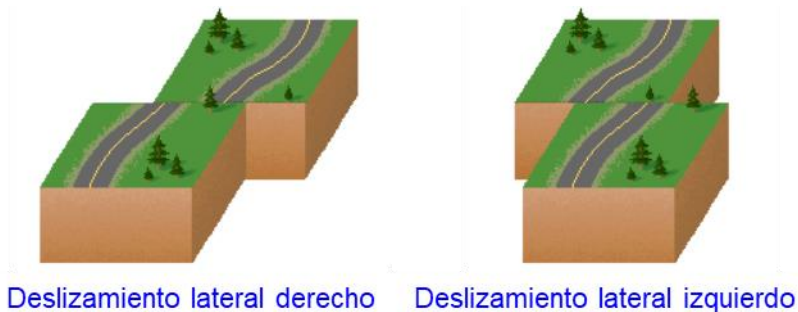
Los bloques limitados por fallas del mismo tipo, pero con sentido de desplazamiento opuesto forman estructuras mayores conocidas como **horts y grabens** (Figura 2). Un bloque hundido, limitado por fallas normales, se conoce como **graben**, y un bloque elevado, se conoce como **horts**.



**Figura 2.** Esquema representativo de horts y graben.

Las fallas también tienen un sentido de desplazamiento, en el caso de las fallas de rumbo el desplazamiento puede tener dos tipos:

- **Falla de desplazamiento lateral derecho (dextral o right-lateral) (Figura 3).**- Cuando el sentido del movimiento entre los bloques es en sentido horario.
- **Falla de desplazamiento lateral izquierdo (sinistral o left-lateral) (Figura 3).**- Cuando el sentido del movimiento entre los bloques es en sentido antihorario.

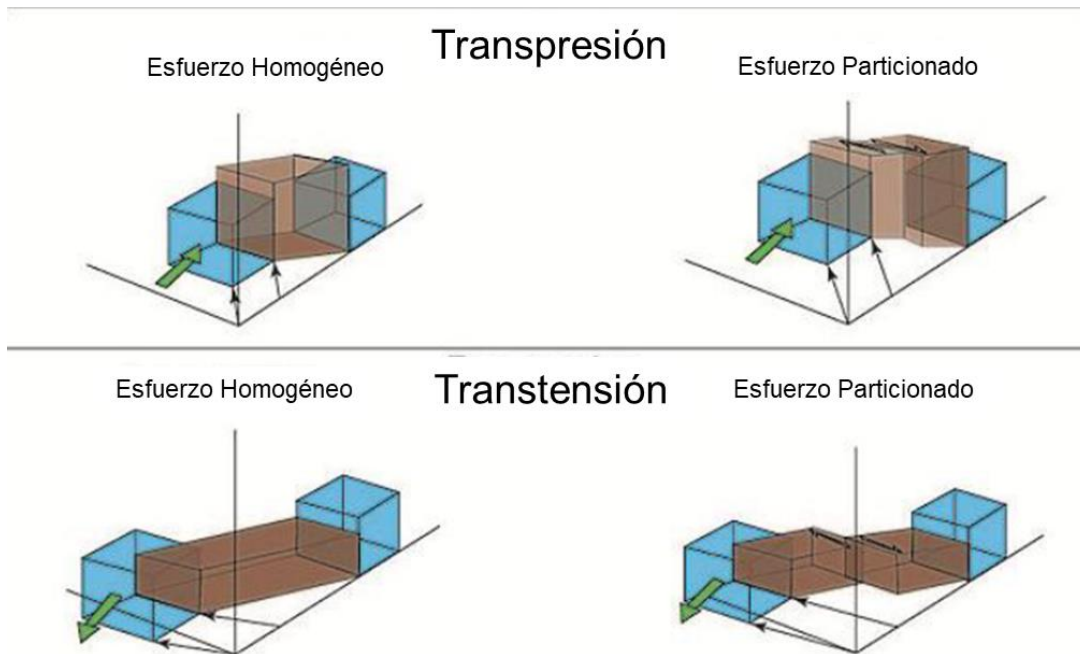


**Figura 3.** Fallas de desplazamiento. Tomada de Griem (2009).

Ocasionalmente, se pueden distinguir cortes en carretera como consecuencia de la aparición de pequeñas fallas donde los estratos sedimentarios se han desplazado unos pocos metros, en la cuestión de obras de ingeniería civil y geotecnia las fallas de esta escala generalmente ocurren como interrupciones discretas individuales y suelen ser de interés en el estudio.

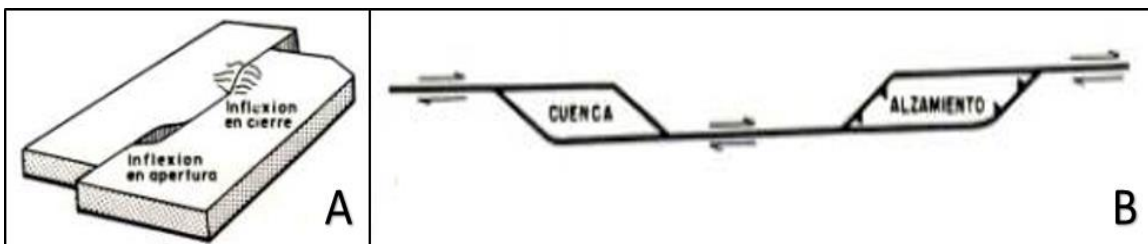
Los cambios locales en la dirección del fallamiento de rumbo, se crean zonas donde la tendencia de la falla es oblicua a la dirección del fallamiento, causando ya sea extensión o compresión a lo largo de la falla.

- Donde el desplazamiento de rumbo esté combinado con extensión, el proceso se denomina **transtensión** (Figura 4).
- Donde el desplazamiento y la compresión se combinan, el resultado es la **transpresión** (Figura 4).



**Figura 4.** Esquema de desplazamiento de transtensión y transpresión.

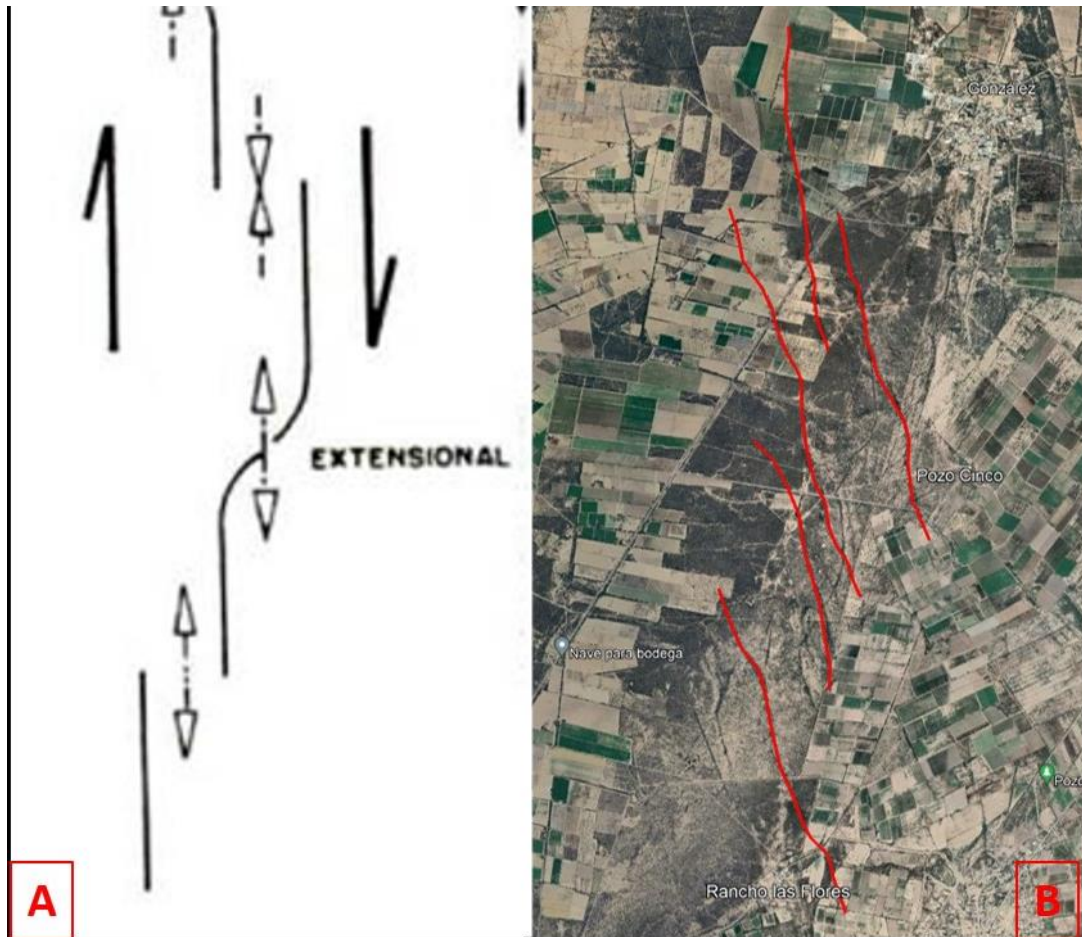
Consecuencia de estos esfuerzos son las llamadas fallas en *échelon* que ocurren como un “salto” en el plano de falla, mantienen una parecida dirección y el mismo sentido de movimiento; dentro de estas fallas existen zonas de apertura y cierre, que pueden dar lugar a depresiones llamados más comúnmente *pull-aparts*, que comúnmente son rellenadas por materiales sedimentarios, o se pueden provocar alzamientos compresionales llamados *push-ups* (Figura 5).



**Figura 5.** Esquema de pull-apart y push-up. A) Depresión (pull-apart) y alzamiento compresional (push-up), y B) esquema en planta de la situación observada en A).

Tomada de Davis y Reynolds (1996).

Existe otro tipo de fallas que surgen gracias a estos esfuerzos, y son llamadas de *relevo*, estas se refieren a que se encuentran de manera subparalelas, que en planta se disponen de forma graduada y continua, es decir, que aparece una falla cuando desaparece otra, con un desplazamiento en sentido horizontal (Figura 6).



**Figura 6.** Esquema de fallamiento de relevo. [A] Esquema idealizado del fallamiento de relevo extensional. [B] Fallas con comportamiento de relevo en la zona de estudio.

De una forma más convencional, se le llama *Discontinuidad*, que a su vez se le conoce como *fallas del terreno*, quiere decir que este término puede ser utilizado sin abarcar términos geológicos, tomando en cuenta agrietamientos, fracturas y fisuras. Estas se pueden manifestar por una serie de fallas en el suelo que se profundizan hacia el subsuelo, llegan a tener forma alargada y una abertura que puede ir de unos pocos centímetros a metros, de igual forma puede ser su extensión ya que de forma lineal puede adquirir cientos de metros a pocos kilómetros; además, puede causar en conjunto otro tipo de eventos como los son: hundimientos del suelo, socavones, oquedades y colapsos del subsuelo por licuefacción, y como consecuencia daños a la infraestructura, generando cuarteaduras en su estructura hasta desplomes en edificaciones relativamente cercanas, creando un peligro en zonas urbanas.

En el Atlas de Riesgos del Estado de México (2018) se menciona que las fallas del terreno se pueden generar por diferentes factores:

- Que en el subsuelo no haya una buena consistencia mecánica.
- Existencia de agua en el subsuelo.
- Infiltración de agua en el subsuelo.
- Capa firme o roca dura en el subsuelo.

## **2.2 Google Earth**

Uno de los navegadores geográficos más conocidos en el mundo es Google Earth, pues es una potente herramienta para observar, crear y compartir archivos de información interactiva como pueden ser imágenes, modelos en 3D, topografía, flora y fauna, etc., (Barros-Bravo, 2008).

Para aplicaciones en el ámbito geológico Google Earth cuenta con búsquedas georreferenciadas que ayudan a obtener información de cartografía geológica por medio de la observación de imágenes satelitales, esta forma de cartografía es también conocida como fotointerpretación, es decir, que los elementos geológicos existentes en la naturaleza son plasmados en un mapa base; por lo general la visualización de imágenes es de muy buena calidad, de modo que la geometría de una determinada estructura geológica puede quedar bien establecida sin la necesidad de recurrir a trabajos de campo.

Una de las herramientas más importantes, y que en la mayoría de las ocasiones ayuda a entender los procesos y evolución que llevaron a los resultados presentes en la geología de un sitio, es de imágenes históricas (Figura 7), ya que gracias a esta herramienta se ha podido visualizar la modificación de ríos, migración de dunas, colapsos, fallas y agrietamientos; así como, de fenómenos gravitacionales.



**Figura 7.** Representación del uso de las imágenes históricas de Google Earth. Tomada de Fernández *et al.*, 2010.

## 2.3 Fotogrametría

La fotogrametría se define como la ciencia que permite la elaboración de mapas y/o planos a partir de fotografías realizadas bajo condiciones específicas. Y la más extendida de sus posibles ramas es la fotogrametría aérea, en la que, a partir de la toma de fotografías aéreas bajo condicionamientos geométricos, se pueden elaborar planos y mapas de áreas extensas con agilidad y exactitud (Quirós, 2014).

Se puede describir a la fotogrametría como versátil y aplicable para diversas áreas. Todo empezó dándole importancia al patrimonio cultural, después aparecieron varios y distintos enfoques, desde la fotogrametría de corta distancia hasta la fotogrametría aérea, y recientemente la fotogrametría UAV (drones). El alcance de la fotogrametría es tan amplio que no solo depende del equipo utilizado, sino también del tipo de objetos que es capaz de manejar, desde pequeños objetos como antigüedades, hasta excavaciones arqueológicas, sitios geológicos de interés, en los mismos cuerpos de agua, un sinfín de aplicaciones que existen hoy en día.

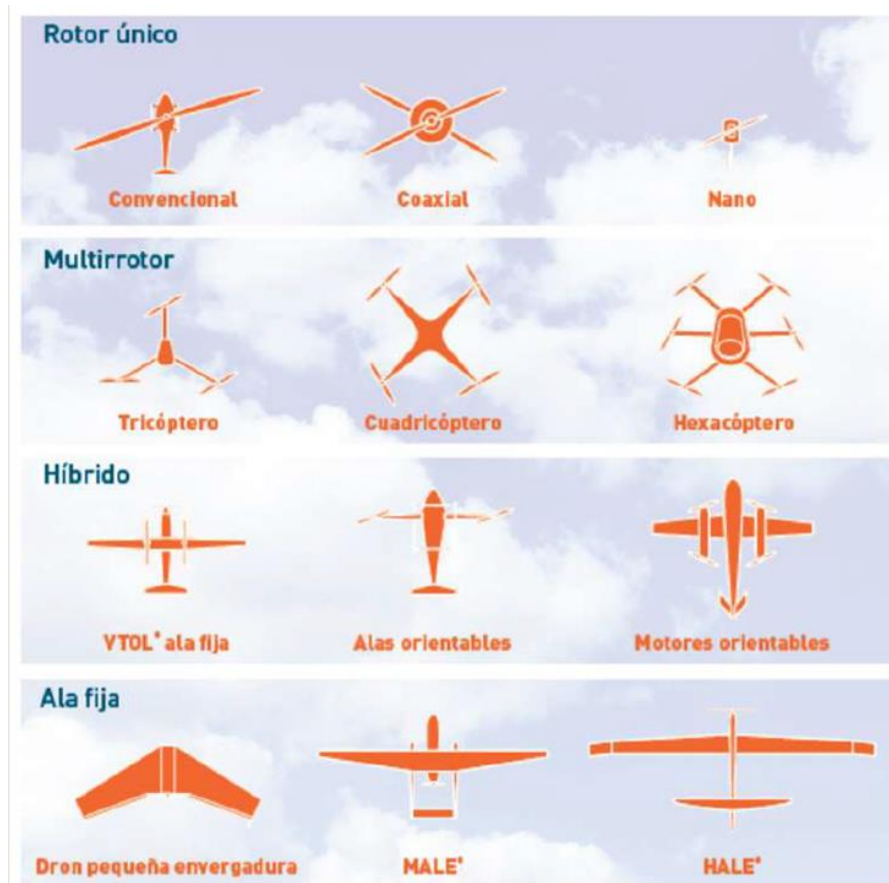
### 2.3.1 Drones

Del inglés procede la palabra “dron” y la traducción al castellano es “abeja macho”, esto debido al zumbido que genera cuando vuela. La Agencia de Seguridad Estatal y Aérea (AESA) de España, describe a los drones como aeronaves que son pilotadas a control remoto, aunque se le conoce más

comúnmente como vehículo aéreo no tripulado “VANT” (Ministerio de Fomento, 2018); que también tiene abreviaciones como “UAV” que en el inglés sería unmanned aerial vehicle y traducido al español es vehículo aéreo no tripulado, sin embargo, se le conoce más apropiadamente con las siglas “RPAS” que en inglés significa Remotely Piloted Aircraft System y su traducción es Sistema Aéreo Piloteado Remotamente.

El origen de estas recientes tecnologías como lo son el UAV, es militar, que tienen una importancia histórica pero poco conocido en sus inicios de existencia, inicia en la década de 1990 en un programa de la NASA con socios de la industria, lo que dio como resultado mejores sensores, motores y diseños de vehículos capaces de tener una mayor altitud y distancia de vuelo. En años recientes el incremento en el uso de los vehículos aéreos no tripulados es debido a que se ha mejorado principalmente los sistemas de posicionamiento global (GPS), ya que existe una mayor precisión en los sistemas de medición inercial de unidades (IMU) (Turner et al., 2014).

Atendiendo a lo antes mencionado en el Plan Estratégico de Drones del Ministerio de Fomento de 2018 se establece una clasificación más detallada (Figura 8):



**Figura 8.** Tipología de drones. Fuente: Plan Estratégico de Drones del MFOM, 2018.



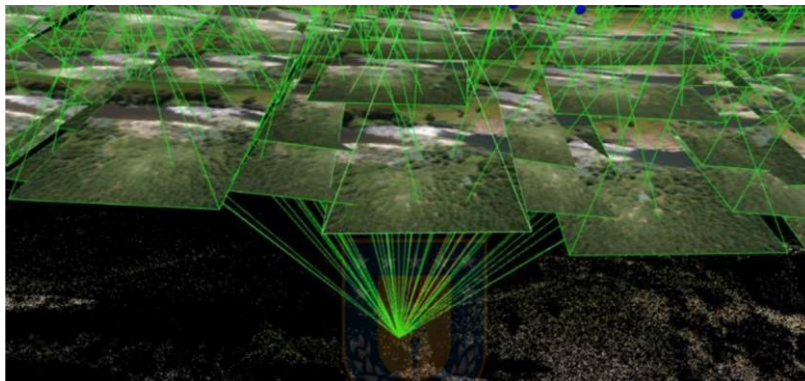
En el 2019 en el mes de octubre se aprobó la Norma Oficial Mexicana 107-SCT3-2019 y entró en vigor en noviembre de ese mismo año, en dónde se establece como objetivo principal las disposiciones legales aplicables para efecto de la operación de los RPAS, en una forma segura, armonizada y fluida, que se equiparable a las operaciones de las aeronaves tripuladas. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes define en la Norma Oficial Mexicana que un dron es un RPAS, y los clasifica de la siguiente manera de acuerdo con su tamaño (Agencia Federal de Aviación Civil, 2020):

- Micro (igual o menor a 2 kg). Que lo define como recreativo pequeño, privado no comercial o comercial.
- Pequeño (mayor a 2kg y hasta 25kg). Que se refiere a recreativo, privado no comercial o comercial.
- Grande (mayor a 25kg). Que se define como recreativo, privado no comercial o comercial.

### 2.3.2 Fotogrametría aérea

Se le llama fotogrametría aérea a la técnica de utilización de una o varias fotografías hechas sobre un objeto, al cual se le estudiará y definirá con precisión su forma, dimensiones y posición en el espacio en el que se encuentre este objeto (Clavo, 1982).

La técnica de la fotogrametría se basa en la estereoscopía que, mediante la toma de imágenes del terreno desde dos puntos de vista, se puede reproducir el relieve del terreno (Quirós, 2014) (Figura 9). Es decir, que esta técnica tiene como objetivo obtener con precisión las características de un objeto definido en un espacio utilizando esencialmente medidas hechas en una o varias fotografías, esta técnica no se utiliza para interpretar fenómenos, si no que mediante las tomas aéreas mapas y planos de gran exactitud.



**Figura 9.** Ejemplo de fotografías aéreas asociadas a un punto en el terreno. Fuente: Tomada de Díaz-Sotomayor, 2019.

## **2.4 Métodos Geofísicos**

Los primeros trabajos reportados dónde se utilizaban las técnicas geofísicas fueron en la década de 1970 (Bogoslovsky & Ogilvy, 1977), y con el paso de los años su uso ha ido incrementando, aunque existe un menor número de trabajos de investigación referenciados a la investigación de fallas geológicas.

La exploración geofísica es una actividad en dónde se aplican las ciencias físicas en cuanto al estudio de la composición y estructura de los recursos naturales así como del material geológico que lleguen a representar un interés económico para la sociedad; existen las limitaciones como en cualquier otro método de medición, en este caso uno de los límites más importantes es la carencia de un contraste suficiente entre las propiedades físicas o químicas del material en el lugar en el que se esté realizando el estudio (Manilla-Aceves, 2003).

Villalpando-Tovalín (2016) menciona que la aplicación de los métodos geofísicos se encuentran varias ventajas, entre ellas están principalmente que: a) son flexibles, quiere decir que son relativamente rápidos y pueden ser desplegados en ciertas pendientes, b) no son invasivos y llegan a dar información sobre la estructura interna de la masa del suelo o roca, y c) se puede abarcar extensiones grandes de superficie dónde se esté realizando el estudio y/o investigación; aunque también existen las desventajas, como lo son: a) mayor altura la resolución espacial disminuye, b) durante el proceso de adquisición es posible que se tengan inconsistencias en el conjunto de datos, por lo que es necesario calibrar de forma constante el equipo para disminuir este problema, y c) la obtención de parámetros físicos en lugar de las propiedades geológicas y/o geotécnicas que son necesarias para cualquier estudio, aunque posteriormente se correlaciona con los datos obtenidos.

### **2.4.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)**

Una de las técnicas geofísicas más antiguas es la prospección geoeléctrica, y ha evolucionado en función de las capacidades del procesamiento de datos y los equipos de adquisición, este método se basa en la resistividad eléctrica y es de los más utilizados para la investigación superficial (Rodríguez, 2015).

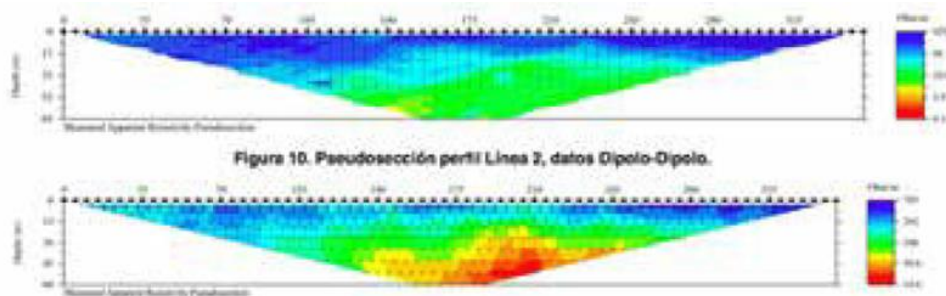
La aplicación principal consiste en localizar cuerpos de materiales geológicos capaces de almacenar agua; zonas de agua caliente o vapor; estratos arcillosos encajonados por rocas, o más compactos; mapeo de contaminantes; demarcación de plumas de contaminantes, y localización de oquedades, entre otros.

La resistividad de los materiales geológicos incluyendo el agua pueden variar desde unos cuantos ohms-metro hasta cientos de ellos por arriba o por abajo dependiendo de la alteración, fracturamiento, grado de saturación, iones en solución, temperatura, porosidad y compacidad (Tabla 1).

**Tabla 1.** Tabla de resistividades de diferentes materiales. Modificada de Figuerola (1974).

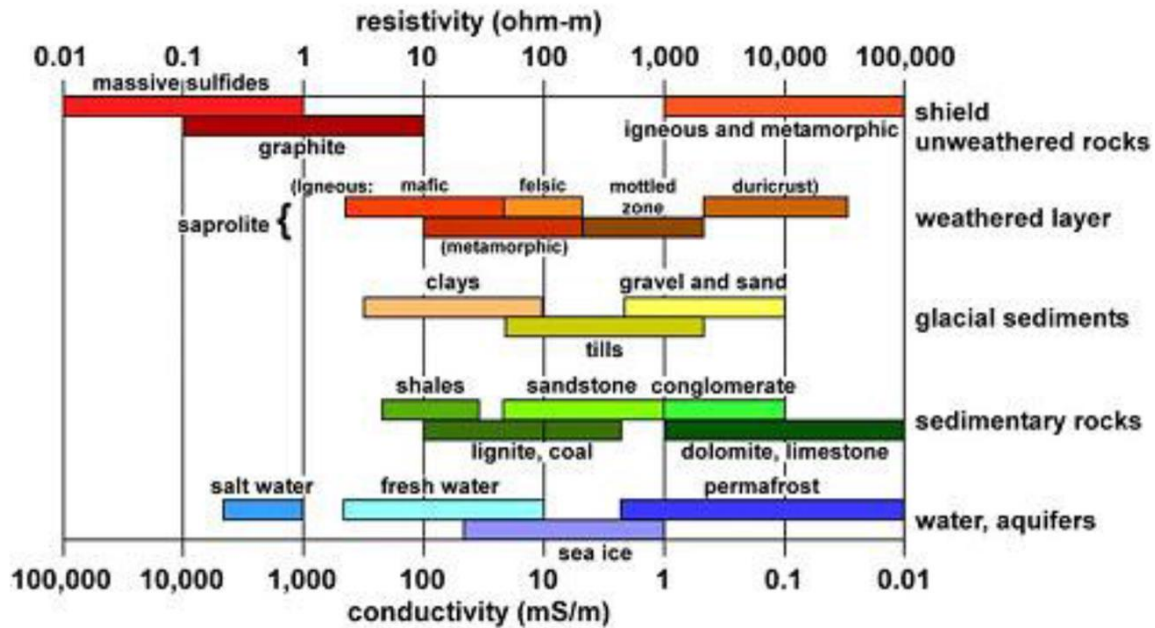
<b>MATERIAL</b>	<b>RESISTIVIDAD (Ohms-cm)</b>	
	Mínimo	Máximo
<b>Azufre</b>	$10^{17}$	
<b>Mica</b>	$10^{10}$	$10^{15}$
<b>Sal gema seca</b>	$10^{10}$	$10^{15}$
<b>Calcita</b>	5	$10^{14}$
<b>Cuarzo</b>		$10^{14}$
<b>Granito seco</b>	$10^8$	$10^{11}$
<b>Arenisca seca</b>	$10^6$	$10^{10}$
<b>Limolita</b>	$10^7$	
<b>Caliza seca</b>	$10^5$	$10^6$
<b>Caliza húmeda</b>	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$
<b>Mineral de pirita, seco</b>	$10^3$	$10^4$
<b>Mineral de pirita, húmeda</b>	$10^2$	$10^{-1}$
<b>Calcopirita</b>	1	$10^{-1}$
<b>Calcopirita, húmeda</b>	$10^{-2}$	$10^{-3}$
<b>Marga, seca</b>	$5 \cdot 10^3$	$10^4$
<b>Marga, húmeda</b>	$10^2$	$10^3$
<b>Arcilla, seca</b>	$8 \cdot 10^3$	
<b>Arcilla, húmeda</b>	10	$10^2$
<b>Sal gema, húmeda</b>	5	20
<b>Grafito</b>	$3 \cdot 10^{-2}$	
<b>Cobre</b>	$1.7 \cdot 10^{-6}$	
<b>Plata</b>	$10^{-6}$	
<b>Agua pura de montaña</b>	$10^4$	$3 \cdot 10^5$
<b>Agua con 3% de sal</b>	5	10
<b>Agua con 20% de sal</b>	3	

Este método tiene como objetivo determinar el valor de resistividad real del subsuelo a lo largo de una superficie o perfil, por lo que se obtienen imágenes resistivas del subsuelo, con la mejora en la obtención de medidas de la profundidad y lateralmente, dando como resultado un modelado en 2D y 3D (Rodríguez, 2015). Los resultados de la aplicación de este método usualmente se grafican en forma de seudo sección, en donde el eje horizontal es la distancia a lo largo del perfil y el eje vertical es una distancia conocida como seudo profundidad; la interpretación de una seudo sección de resistividad aparente de forma cualitativa, no es obvia, debido a que la relación entre la resistividad aparente y la resistividad del subsuelo por naturaleza no es lineal (Oliver-Ocaño *et. al.*, 2019) (Figura 10).



**Figura 10.** Ejemplo de una seudosección de resistividad aparente obtenida con el método de dipolo-dipolo. Tomada de Oliver-Ocaño *et al.*, (2019).

Los colores que resultan en la seudo sección son la representación de las resistencias al flujo de electrones que ofrecen los diferentes materiales del subsuelo, esta diferencia se debe a la propiedad intrínseca de los materiales a la cual se le llama Resistividad (Figura 11).



**Figura 11.** Rangos típicos de resistividad eléctrica de algunos materiales. Tomada de Palacky (1988).

## **CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

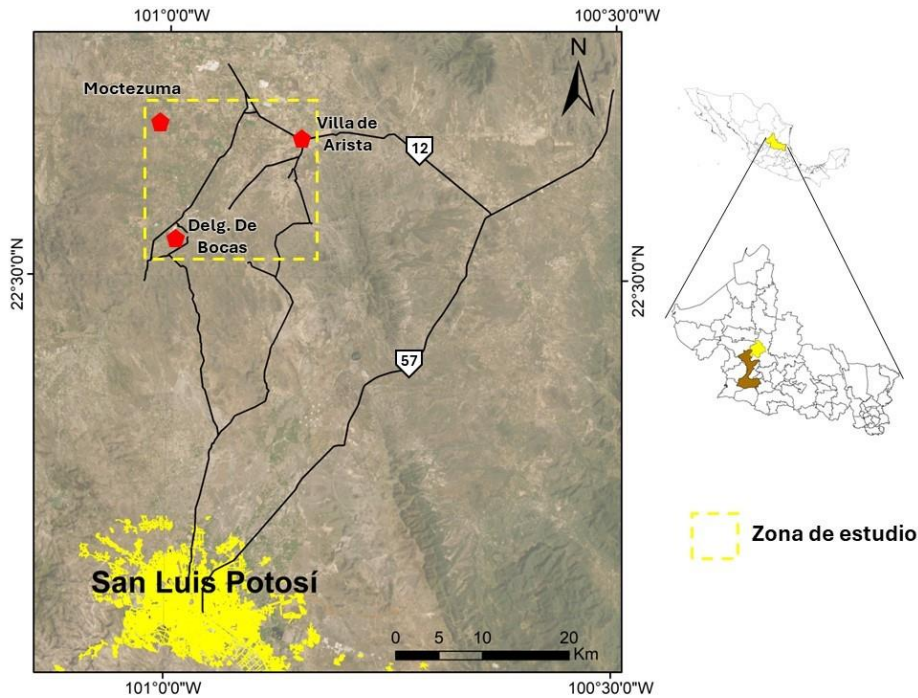
Como antecedente histórico se sabe que Bocas tomó el nombre del lugar donde fue fundada "*Bocas de Maticoya*", que formó parte de lo que en un tiempo se le conoció como "El Tunal Grande", sitio que pertenecía a una parte Chichimeca del altiplano potosino. En el sitio se conoce un lugar llamado Hacienda de Bocas, esta nace al formarse la agricultura y la ganadería potosinas, puesto que cerca de la hacienda pasaba el río, y así abrir aguajes y norias que fueran prosperas para los alrededores; la hacienda era la unidad de producción mixta, es decir, agrícola, ganadera, de beneficio, etc.

Para finales del siglo XIX, se tenía una estación de ferrocarril frente al casco de Bocas, y había otras paradas en lugares cercanos, esto resultaba en beneficio para la producción agrícola y ganadera, es por ello que mucha gente de diferentes estados como Saltillo y Veracruz viajaron hasta este punto para realizar plantíos sobre todo de chile y jitomate, por lo que el agua para mantener estos plantíos era sustraída del acuífero del Valle de Villa de Arista; en la actualidad ya no es suficiente el agua que existe para mantener esta actividad como en aquellos años.

El área de estudio se localiza en el estado de San Luis Potosí, en el municipio homónimo, particularmente en la Delegación de Bocas (Figura 12). Esta zona colinda con los municipios de Moctezuma y Villa de Arista, que también colinda con los municipios de Villa Hidalgo (al este) y Ahualulco (al oeste). La zona de estudio abarca una extensión territorial de 366.38 km<sup>2</sup> de territorio y ocupa el 25.04% del municipio de San Luis Potosí. La Delegación de Bocas se encuentra conformada por 98 comunidades y 10.809 habitantes lo que representa el 1.61% de la población total del municipio. La cabecera delegacional con el mismo nombre se asienta geográficamente a los 101° 01' 17" de Longitud Oeste y 22° 31' 08" de Latitud Norte, a una altitud de 1650 metros sobre el nivel del mar (PMDU, 2007).

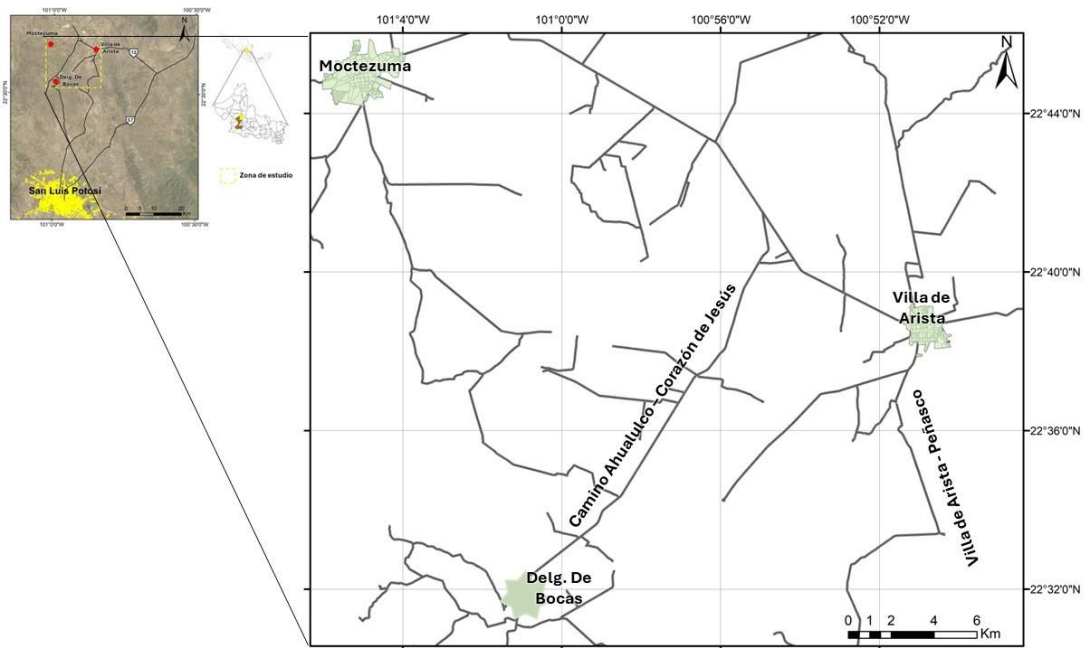
### **3.1 Localización y vías de comunicación**

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la Delegación de Bocas y pertenece al valle de Villa de Arista. Para llegar al área de investigación existen varias vías de acceso, ya que se encuentra ubicada aproximadamente a 30 km en línea recta al noreste de la Ciudad de San Luis Potosí, sobre el Anillo Periférico norte, en el cruce de carretera, rumbo a Peñasco-Bocas, otra opción para llegar a la zona es ir por la carretera 57 partiendo de la ciudad hacia el municipio de Villa de Arista, hasta el entronque (a 18 km) por la carretera estatal No. 12, de la cabecera municipal de Villa de Arista en dirección a Moctezuma (Figura 12).



**Figura 12.** Mapa de vías de comunicación para llegar a la zona de Estudio.

El camino de interés donde se encuentra la mayoría de las fallas es llamado Ahualulco-Corazón de Jesús, que va desde la Delegación de Bocas, hasta topar con la carretera estatal No. 12, que se puede desviar para la izquierda al municipio de Moctezuma y para la derecha al municipio de Villa de Arista (Figura 13).



**Figura 13.** Acercamiento de las vías de comunicación en la zona de estudio.

### 3.2 Geomorfología

Los rasgos que presenta la Delegación de Bocas son abruptos y lomeríos de pendientes suaves. Las elevaciones topográficas varían desde los 2810 metros sobre el nivel del mar en la Sierra de San Miguelito, hasta los 1625 metros sobre el nivel del mar en San Isidro (Ejido de González).

Conforme a la carta geológica con clave F14-A64, se puede definir que la superficie abarcada en la carta se caracteriza por ser un amplio valle al occidente, que corresponde a la porción oriente del Graben de Villa de Arista, el cual está orientado en dirección hacia el noreste. Aquí mismo se distinguen tres conjuntos de sierras, en la porción norte de la carta puede observarse la terminación de la sierra Rincón de Leijas; en la parte central-sur, se observa la porción norte de la sierra del Coro y hacia la esquina noreste aflora el flanco suroeste de la sierra Las Pilas que es donde se presenta la altura máxima de esta carta.

Sin embargo, en la zona de estudio se encuentra una gran parte con una elevación mínima de 1580 m.s.n.m. que se identifica con el color morado, y una elevación mayor de 2230 m.s.n.m. identificable con los colores verdes (Figura 14).

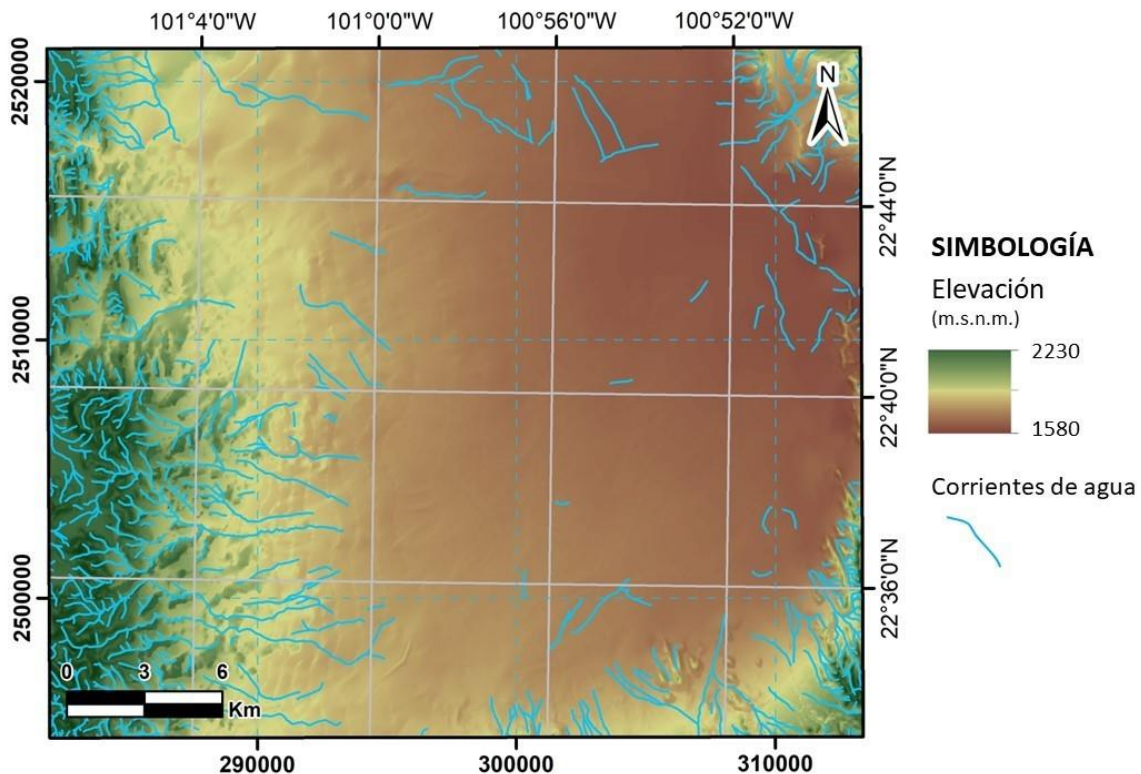


Figura 14. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

### 3.3 Edafología

El tipo de suelo que se encuentra en la zona de estudio es nombrado como Xerosol, siendo estos los de mayor cobertura del estado (INEGI, 2002), ocupando el 42% de la superficie total. Estos suelos se encuentran en zonas áridas y semiáridas, en una amplia región de las subprovincias Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, y Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas, pertenecientes a la subprovincia Mesa del Centro; así como en la subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales; dentro de la provincia Sierra Madre Oriental.

Los xerosoles son de profundidad moderada, aunque existen pequeñas áreas dónde son profundos. Su origen es aluvial en las llanuras y coluvio-aluvial en las bajadas; el material materno consiste de sedimentos que se han originado a partir de roca caliza, la cual da colores claros a estos suelos debido a la baja precipitación en la zona y al bajo contenido de materia orgánica; estos suelos se caracterizan por su alto contenido de sales que se localizan a los alrededores de Santo Domingo, Venado y Las Negritas; profundos y sin restricciones para su uso se localizan en Villa de Arista, cerca de Matehuala; en la parte norte y noreste de la ciudad de San Luis Potosí y en las cercanías de la Ciudad del Maíz (INEGI, 2002).

El suelo es de origen sedimentario con formación aluvial de desarrollo joven, de textura arenosa y de estructura de bloque subangular, es apto para la agricultura y también para la ganadería.

### 3.4 Hidrología

Al poniente del estado de San Luis Potosí, se encuentra el acuífero de Villa de Arista, con clave 2408, siendo parte de la Región Hidrológica Número 37 Salado, cubre una superficie de 4,312 km<sup>2</sup> aproximadamente y abarca parcialmente los municipios de Moctezuma, Villa de Arista, Venado, Charcas, Ahualulco, San Luis Potosí, Villa Hidalgo y Villa de Guadalupe y también corresponde administrativamente a la Región Hidrológico-Administrativa Cuencas Centrales del Norte (DOF, 2015).

INEGI (2002) describe al Valle de Villa de Arista como una depresión tectónica de aproximadamente 45 km de largo por 23 km de ancho, que después fue rellenada por materiales no consolidados, en mayor parte como depósitos aluviales del Cuaternario, cuyo espesor va de 350 a 400m, conteniendo el agua subterránea que forma el acuífero, que por su funcionamiento se considera del tipo libre. Sus características para el año de 1996 eran las siguientes (Tabla 2):

**Tabla 2.** Especificaciones del acuífero del valle de Villa de Arista del año 1996. Información de INEGI (2002)

<b>Caudal Específico</b>	Varía entre 0.05 a 3 l/s/m
<b>Coeficiente de transmisividad</b>	Varía de 0.2 a $5.9 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s



<b>Coeficiente de almacenamiento</b>	0.06 (asociado a material arcilloso, baja porosidad)
<b>Profundidad del nivel estático</b>	Varía de 10 a 110 m
<b>Nivel estático</b>	Varía de 10 a 115 m
<b>Volumen anual (recarga)</b>	27.4 Mm <sup>3</sup>
<b>Volumen anual de extracción</b>	67 Mm <sup>3</sup>

En la Delegación de Bocas es agua superficial se aprovechaba a través de la presa "Bocas", que tiene una capacidad de almacenamiento de 1.0 millones de m<sup>3</sup> donde se aprovechan los escurrimientos del Arroyo Sanja Nueva que es afluente del Río Bocas, se aprovechaba principalmente para la actividad agropecuaria, sin embargo, ya no es suficiente la captación de los escurrimientos de los arroyos, y cuando ocurren tormentas de alta intensidad de lluvias puede causar inundaciones.

### 3.5 Clima

El clima se encuentra determinado por diversos factores geográficos como el relieve, la altitud y latitud (PMDU, 2007). En el municipio estos factores ejercen su influencia definiendo un clima que pertenece al grupo de los secos (B), en particular al tipo climático BS, sin embargo, se consideran tres climas distintos:

El clima *Semicálido con lluvias en verano BS<sub>ohw</sub>* es característico en gran parte de Villa de Arista y Villa Hidalgo, su registro de temperatura media anual es de 18.7° a 21.8° C, y con una precipitación total anual de 328 a 422 mm.

También se registra en el Valle de Villa de Arista el clima *Semicálido con lluvias en verano BW<sub>hw</sub>*, con una temperatura media anual de 18° a 22° C, y una precipitación total anual de 300 a 400 mm.

Ya que la zona de estudio abarca la última parte Norte del municipio de San Luis Potosí, se incluye el clima de tipo *Templado con lluvias en verano BW<sub>kw</sub>*, donde la temperatura anual es de 16° a 20° C y una precipitación total anual de 100 a 400 mm.

### 3.6 Vegetación

En el área de Villa de Arista la vegetación existente es controlada principalmente por el clima, la altitud y las diferencias en el substrato geológico y suelo; basado en la descripción de Rzedowski (1966), clasifica la vegetación del área como matorral, desértico y micrófilo, es decir, que en las partes bajas aluviales donde hay suelo arenoso profundo donde hay acumulación de agua edáfica por lo menos temporalmente, se encuentran los matorrales (mezquital); hacia la base de los cerros de caliza se encuentran restringidos los abanicos aluviales de suelo somero arenoso con gravas, con caliche a poca profundidad y sin agua freática disponible que corresponde a las microfílas (gobernadora).

El área de estudio tiene una vegetación abundante en el valle de matorral desértico micrófilo, terrenos planos, en las partes bajas de los cerros y en los suelos aluviones de dichos valles, también se encuentra el matorral crasirosulifolio que está compuesta por arbustos que se parecen a los magueyes y guapillas en su mayoría, siendo su característica principal la presencia de hojas alargadas o espinosas (PMDU, 2007); dentro del municipio se encuentra ampliamente distribuido el matorral mixto que se alterna con los pastizales, sin embargo, ha sido explotado para utilizarlo como alimento para el ganado.

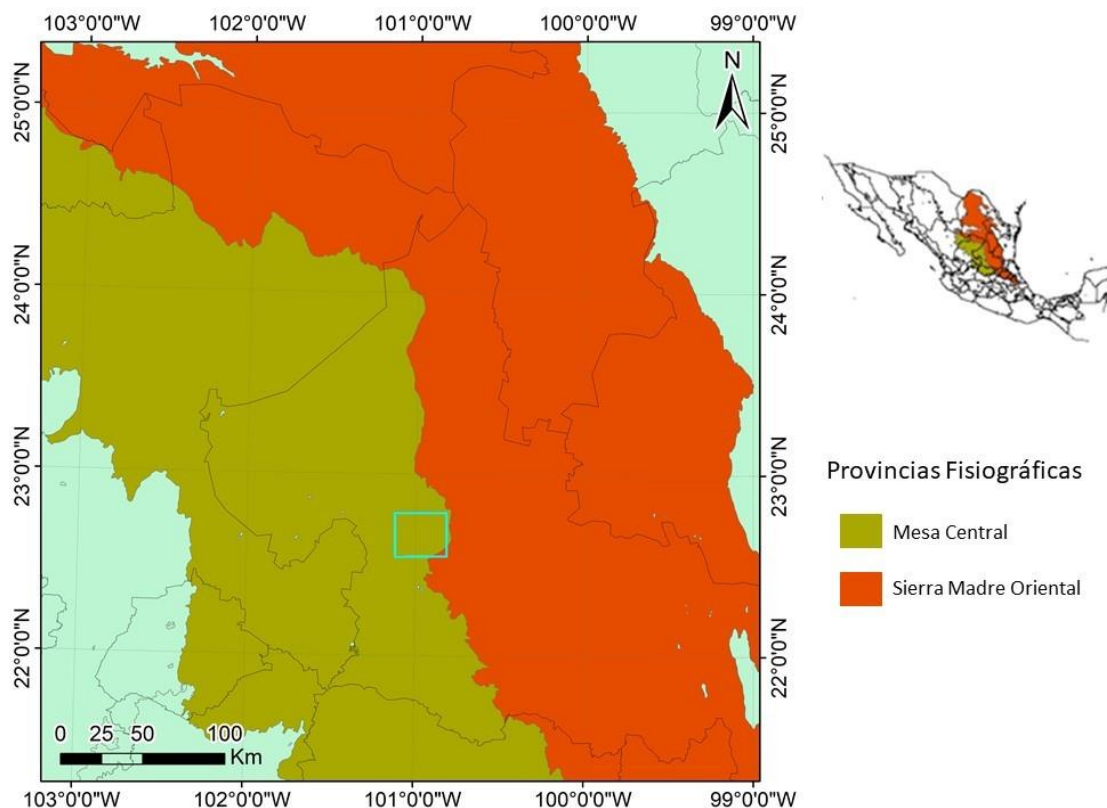
## CAPÍTULO IV. MARCO GEOLÓGICO

### 4.1 Fisiografía

Una provincia fisiográfica es una unidad morfológica superficial de características distintivas (INEGI, 2002); una región se considera provincia fisiográfica cuando cumple las siguientes condiciones: tiene un origen geológico unitario sobre la mayor parte de su área, y una morfología propia y distintiva.

#### 4.1.1 Provincias Fisiográficas

El Estado de San Luis Potosí forma parte de tres de las quince provincias fisiográficas en que se divide el país; Sierra Madre Oriental (SMOr) en la región central, la Mesa Central (MC) en la región occidental, y Llanura Costera del Golfo Norte, y Llanura Costera del Golfo Sur, en la porción oriental del estado. El área de estudio Delegación de Bocas, se localiza dentro de los límites de la provincia fisiográfica MC y una pequeña parte de la SMOr (Figura 15).



**Figura 15.** Mapa de Provincias Fisiográficas que se encuentran en la zona de estudio.

La Mesa Central (MC), se encuentra ubicada en la porción central de la República Mexicana, comprende parte de los estados de Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí y pequeñas

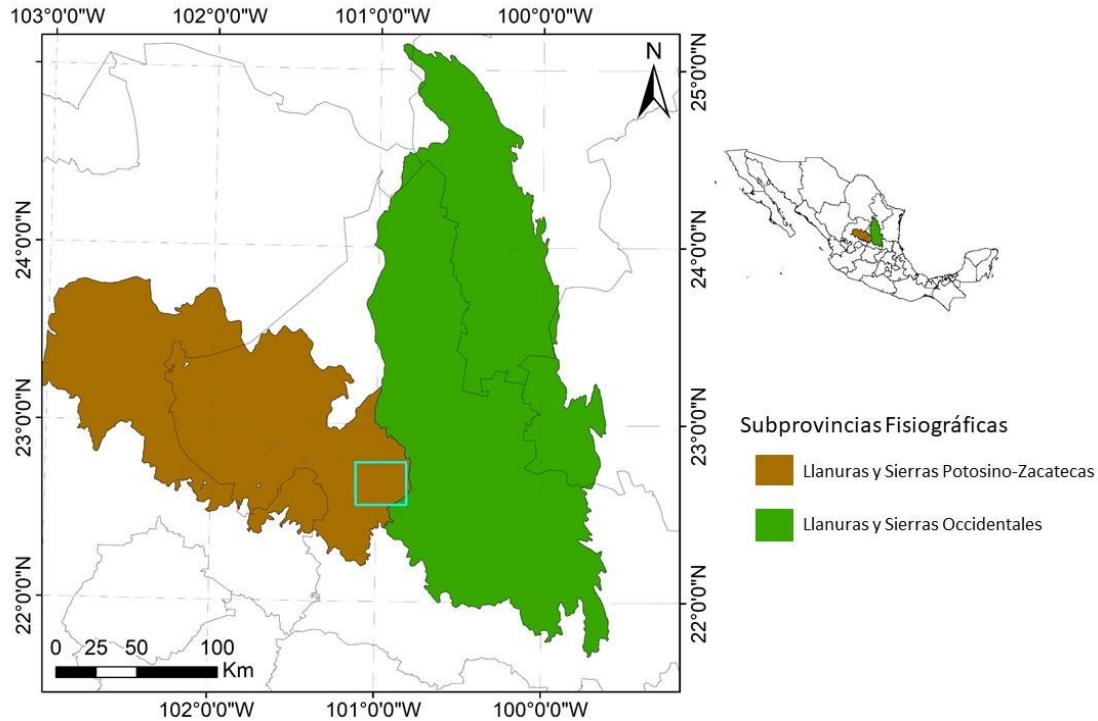
porciones de Tamaulipas y Nuevo León. Su límite al Norte lo constituye el sector transversal de la SMOr, al Sur el Eje Neovolcánico, al oeste la SMOc y al Este, la SMOr (Nieto-Samaniego, 2005).

El estudio tectono-volcánico en la porción oriental de la MC, analizando levantamientos tectónicos y asociándose a fallamiento lateral y extensional, ocurrido posterior a la Orogenia Laramide, también realizó un análisis en cuanto a la relación del vulcanismo con la tectónica extensional, ocurrida durante el Eoceno Medio hasta el Paleógeno Tardío (Tristán-González, 2008). Es decir, se trata de un conjunto fisiográfico que abarca una porción del Altiplano potosino y su principal característica son amplias llanuras interrumpidas por la dispersión de sierras, que en su mayoría son de origen volcánico; con la mayor altitud de 2870 m.s.n.m., y la mínima de 1670 m.s.n.m. que corresponde a la parte baja del Valle de Villa de Arista.

Eguiluz de Antuñano *et al.*, (2000), describen la Sierra Madre Oriental (SMOr) en un modelo de cuña, para explicar las relaciones estructurales respecto a la distribución de las evaporitas, las cuales propiciaron despegues profundos o desbordamientos, pliegues de cajas, y pocas fallas emergentes durante la Orogenia Laramide.

La Sierra Madre Oriental es un conjunto de estratos plegados en sierras menores, los estratos son de roca sedimentaria marina que va del Cretácico al Jurásico Superior, donde la caliza es la roca predominante, le siguen las areniscas y las lutitas; al norte y occidente de la sierra las condiciones son de seca a semisecas, lo que provocan que no haya una red de drenaje significativa, y para la parte media y sur el clima es subhúmedo (INEGI, 2002).

Dentro de ambas provincias se encuentran subprovincias fisiográficas (Figura 16), Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecas se encuentra en la porción centro-norte de la Mesa Central, que corresponde de igual forma a la mayor parte de la zona de estudio, se describe como extensos terrenos áridos con lomeríos al noreste y en el suroeste sierras bajas, el 19.98% de esta región corresponde al estado de San Luis Potosí, específicamente a los municipios de Moctezuma y Villa de Ramos, así como en Aqualulco, Charcas, Mexquitic de Carmona, Salinas, Santo Domingo, San Luis Potosí, Venado y Villa de Arista; al oriente de la cabecera municipal de Moctezuma se encuentra una gran llanura aluvial, y al noreste de ésta, otra llanura de piso rocoso (INEGI, 2002). La siguiente subprovincia pertenece a la Sierra Madre Oriental, es llamada Llanuras y Sierra Occidentales, donde predominan las rocas calizas, enlazadas por brazos de cerriles, producen una especie de red de sierras donde se hallan espacios planos (llanuras) que están cubiertos por aluvión. Una porción de esta subprovincia abarca los municipios de Alaquines, Cerro de San Pedro, Cd. del Maíz, Cárdenas, Rayón, Río Verde, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Villa de Arista, Venado y Zaragoza.



**Figura 16.** Mapa de Subprovincias Fisiográficas.

## 4.2 Tectónica

Una de las teorías más importantes dentro de la zona estudio regionalmente es el hecho de que sea la última parte del Graben de Villa de Reyes (GVR), que se encuentra como una de las estructuras más sobresaliente dentro de lo que se conoce como Provincia de Cuencas y Sierras (Basin and Range), donde la porción entre San Luis Potosí y Sierra de Guanajuato está limitada por fallas conjugadas y hacia el norte se comporta como una serie de medios grabens (Tristán-González et al., 2009a); también existen otra fosas que son perpendiculares al GVR como la de Bledos, Paso Blanco, Enramadas y Santa Rosa (Labarthe-Hernández et al., 1982; Tristán-González, 1986). También forma parte del Sector Transversal de Parras de la Sierra Madre Oriental que constituye el límite norte de la Mesa Central, sin embargo, en los límites este, oeste y sur se encuentran formados por sistemas de fallas regionales donde se tiene documentada actividad cenozoica (Nieto Samaniego, 2005); en el límite este se encuentra el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) y cuya edad pertenece al Oligoceno que varía de norte a sur en la región central (San Luis Potosí) y en el límite sur de edad Mioceno (San Miguel de Allende).

Este sistema está constituido por fallas normales con dirección N-S y se extiende desde San Miguel de Allende y Querétaro hasta el norte de la Sierra de Catorce, un rasgo morfológico del SFTSMA dentro de la Mesa Central son varios lineamientos que se encuentran segmentados con una dirección de NW-SE (Almaguer-Ramírez, 2014).



normales, se encuentra el sistema San Luis de la Paz-Salinas de Hidalgo con dirección de NW-SE, la falla del Bajío y el Graben de Bledos con direcciones de NE-SW, y un sistema N-S compuesto por la falla San Miguel de Allende, el graben de San Luis de la Paz y la parte norte del graben de Villa de Reyes (Alaniz-Álvarez et al., 2001).

Tristán-González (1986) propone que en el Graben de Villa de Reyes se tiene una orientación de NE-SW, que continúa hacia el sur hasta la Sierra de Guanajuato, y hacia el Norte (dónde empieza la zona metropolitana de San Luis), cambia en un rumbo de inflexión hacia el NW-S-SE donde se encuentra la zona de estudio GVA (Figura 17), que continua hasta lo que es el municipio de Charcas, sin embargo, otros autores marcan el final de estas estructuras en Villa de Arista, ya que no se encontró mayor evidencia de vulcanismo más allá de este municipio. Es importante tener en cuenta todas estas evidencias para explicar que las fallas que se encuentran en Villa de Arista se crearon mucho antes de las cuencas y plataformas existentes, y en el terciario, Paleogeno, Eogeno estuvo presente el vulcanismo, y en el Eoceno yendo para Bocas se encuentran unos embalses y acuíferos importantes, es valle aluvial, y se encuentra roca volcánica félsica.

### 4.3 Litología

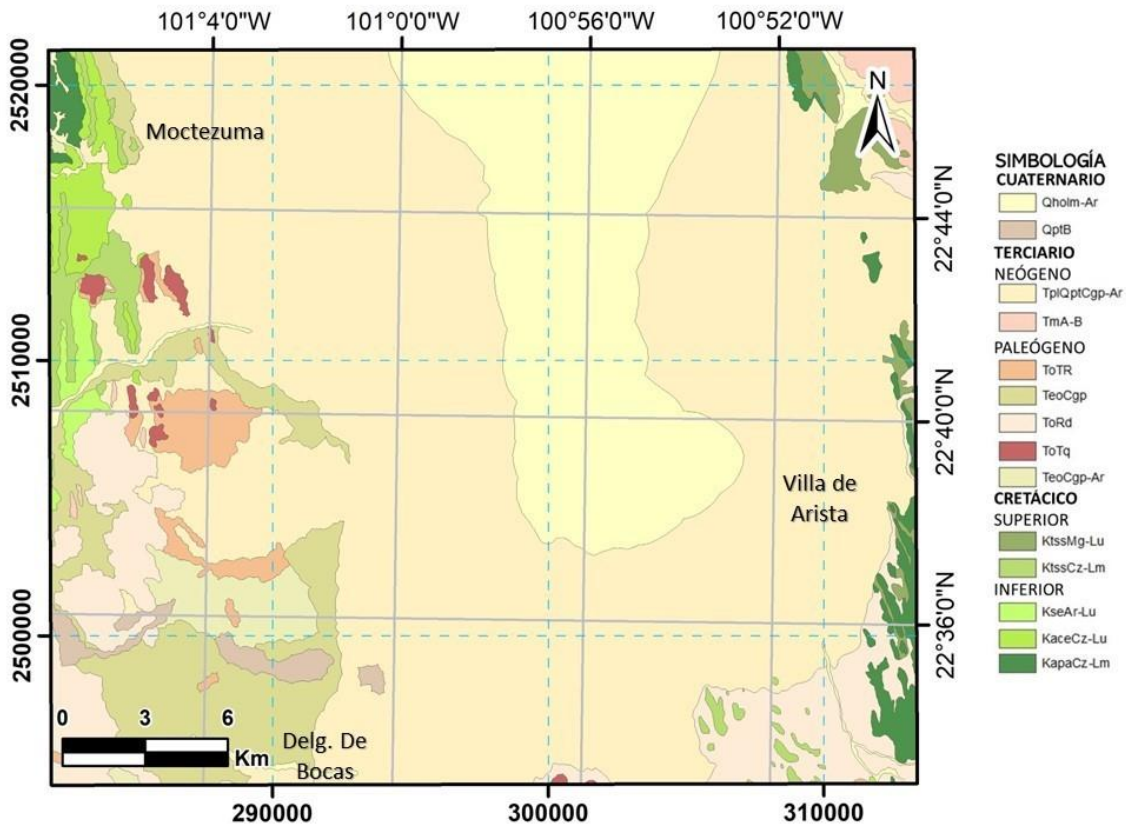


Figura 18. Mapa geológico de la zona de estudio.

La carta geológica fue reconstruida a partir de dos cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano, la F14-A64 y F14-A63, que corresponden al municipio de Villa de Arista y Moctezuma respectivamente (Figura 18). La zona de interés se encuentra ubicada entre dos grandes unidades paleogeográficas, la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) y la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP).

La columna estratigráfica dentro el graben de Arista-Ahualulco con rocas sedimentarias marinas y volcánicas continentales del Cretácico al Cuaternario, la estratigrafía Mesozoica está constituida principalmente por rocas sedimentarias marinas y arcillosas, pertenecientes a las formaciones Indidura y Caracol, respectivamente (Shunshan Xu et al., 2021).

### **4.3.1 Cretácico Inferior**

#### **4.3.1.1 Formación La Peña (KapaCz-Lm)**

Descrita por Imlay (1936) la Formación La Peña se divide en dos miembros, el miembro inferior consiste en una caliza de gris oscuro a gris claro, de estratos medianos a gruesos; el miembro superior consiste en calizas de capas delgadas y lutitas interstratificadas. Se distribuye en gran parte de la porción norte-noreste de México, desde la Sierra Madre Oriental y Cuenca de Tamaulipas, hasta la porción centro-noroccidental de la Mesa Central de México (Labarthe *et al.*, 1982).

#### **4.3.1.2 Formación Cuesta del Cura (KaceCz-Lu)**

Concordantemente se encuentra la Formación Cuesta de Cura, descrita por Imlay (1936), se compone por capas delgadas de caliza ondulosa y compacta de color gris oscuro a negro, se incluyen lutitas de color gris y numerosos lentes de pedernal. Esta formación se registra en San Luis Potosí en la Sierra de Catorce y su distribución se amplía al norte y noreste de México, en la Sierra Madre Oriental y Mesa Central (Barboza-Gudiño *et al.*, 2004).

#### **4.3.1.3 Formación Caracol (KseAr-Lu)**

Un examen petrográfico que se realizó en muestras de Concepción del Oro, indica que las rocas de la Formación Caracol consisten en rocas areniscas arcóscicas, calcáreas, que por su composición pueden aproximarse a una grauvaca (Rogers *et al.*, 1957). Se observa en pequeños afloramientos entre la Sierra de San Francisco Coahuila y la Sierra de Gabán, Zacatecas, está cubierta de aluvión (Ledezma-Guerrero, 1967).

### **4.3.2 Cretácico Superior**

#### **4.3.2.1 Formación Indidura (KtssCz-Lm)**



Para San Luis Potosí, en la Sierra de Catorce, Barboza-Gudiño *et al.*, (2004) describe a la Formación Indidura como una caliza arcillosa y lutita de color gris a pardo, las capas de caliza varían en una secuencia rítmica con arcillas y materiales probablemente volcánoclasticos de color café, gris, blanco, amarillo y rojo.

Existe una formación de miembros calcáreos formados por margas y lutitas (KtssMg-Lu), que pertenecen a la zona de talud, en el margen occidental de la PVSLP.

### **4.3.3 Terciario**

#### **4.3.3.1 Paleógeno**

La secuencia cretácica fue cubierta discordantemente por un conglomerado policmítico (TeoCgp-Ar), que se formó por la desintegración de las rocas preexistentes.

Después se desarrolló un vulcanismo constituido por derrames de composición traquítica (ToTq), así como de composición riodacítica (ToRd) que forma domos de textura porfirítica compacta.

En los márgenes de la sierra se presenta una acumulación de sedimentos clásticos continentales constituidos por conglomerado polimítico (TomCgp).

Al final se reinicia la actividad ígnea que permite el depósito de toba riolítica (ToTR), grada con horizontes de grano fino.

#### **4.3.3.2 Neógeno**

Se generaron derrames fisurales, que fueron constituidos por andesita y basalto (TmA-B) afanítico.

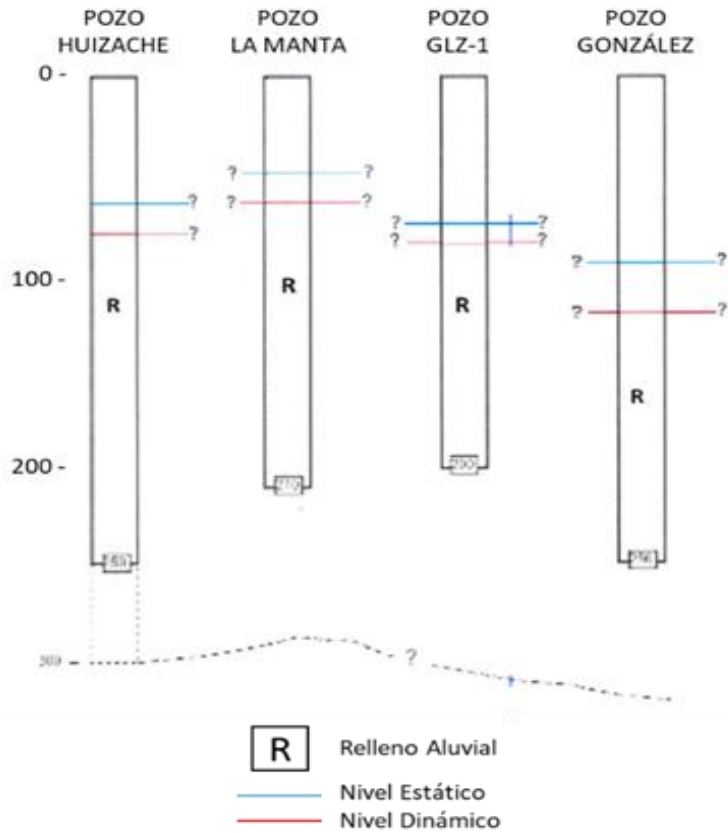
Tiempo después se acumuló principalmente en las partes bajas de los arroyos y laderas de los cerros un conglomerado polimítico y arenisca (TplQptCgp-Ar), causado por la desintegración y erosión de las rocas preexistentes.

#### **4.3.4 Cuaternario**

Causado por la desintegración y erosión de las rocas preexistentes; como última actividad volcánica de zona de estudio se encuentran derrames y piroclastos de composición basáltica (QptB), y se encuentra en la mayor parte del área de estudio el depósito de limos y arenas (Qholm-Ar).

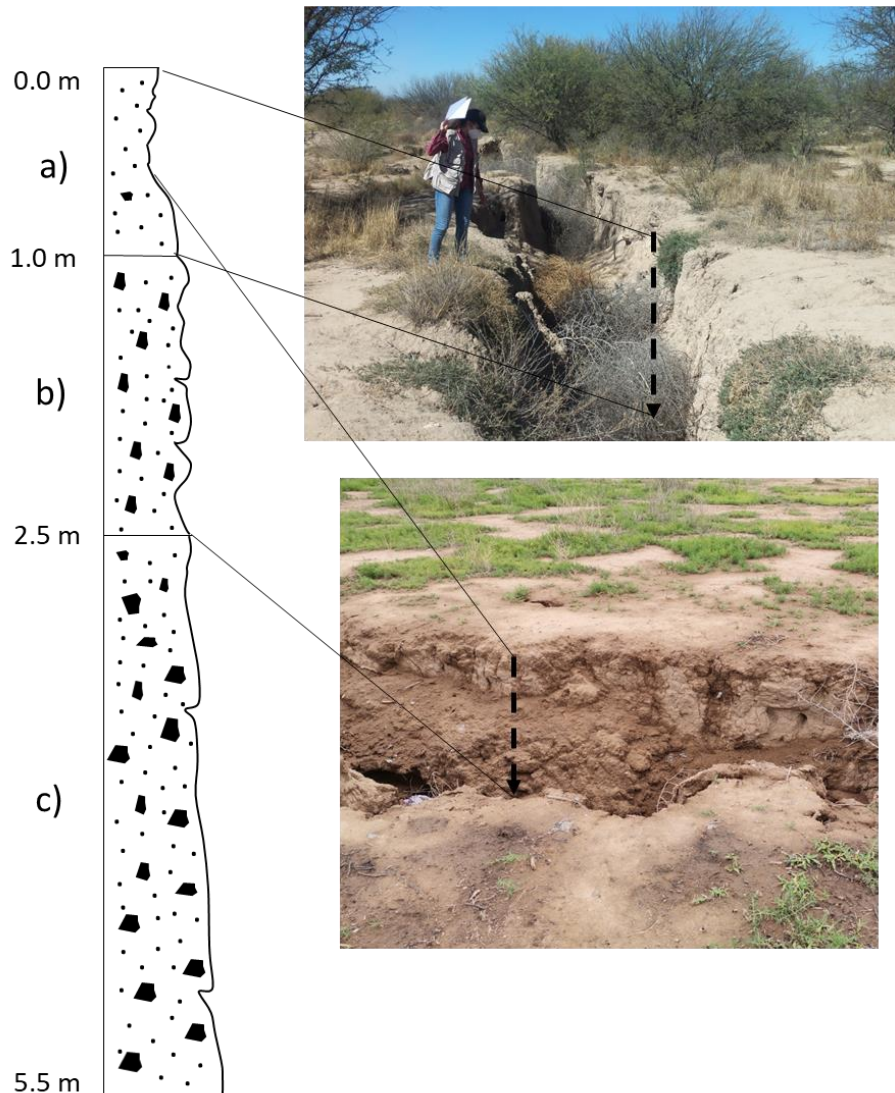
Con base en la interpretación generada por la Comisión Nacional del Agua y Martínez-Ruiz (1983), a partir de la descripción de cortes de pozos se pudo obtener la estructura y composición de la estratigrafía de la zona de estudio

(Figura 19). Estos pozos no han llegado hasta el piso rocoso, ya que son pozos de agua potable y solo se ha perforado hasta los 300 m, cortando el relleno aluvial.



**Figura 19.** Esquema de Pozos de la C.N.A. del relleno aluvial y nivel estático y dinámico. Tomado de Mata-Segura (2017).

Con lo observado en los pozos se pudo tener descripción de la superficie del área, que se presenta en pendientes suaves que se localizan dentro del Graben de Villa de Arista, dónde se identificaron por Martínez-Ruíz (1983) tres horizontes (capas) de material granular, el horizonte superficial (**a**) consta de una capa de limo y arena de color gris claro, con un espesor que varía de 80cm a 1.0 m; el horizonte que se encuentra en medio (**b**) consta de un espesor aproximado de 1.5 m, y se compone de material limo-arenoso de tonos rojizos con poca presencia de líticas de roca volcánica; el tercer horizonte (**c**) consta de depósitos de líticas de roca volcánica que se encuentran en una matriz de ceniza volcánica y su espesor es de  $\pm 3$ m (Figura 20).



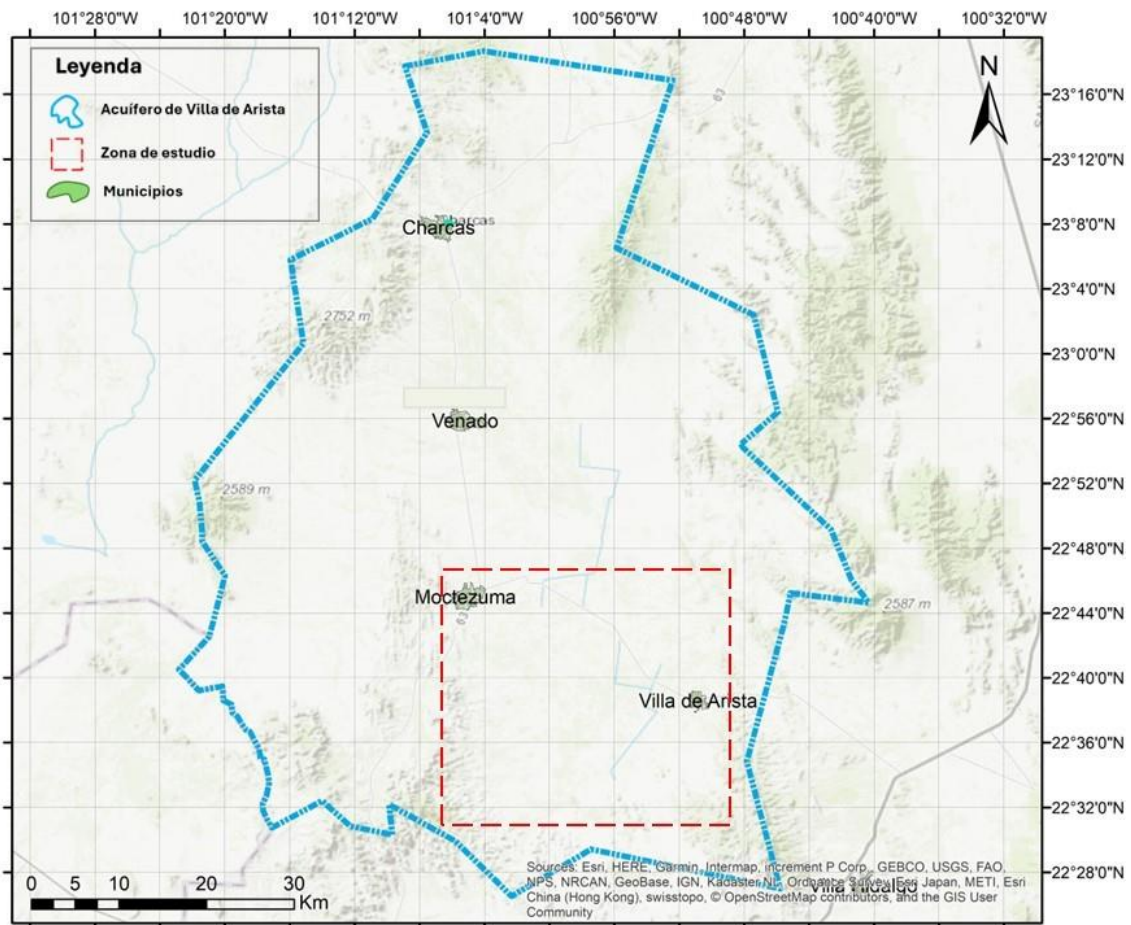
**Figura 20.** Esquema de columna litológica. Del lado izquierdo se observa una columna realizada por Mata- Segura (2017) basado en Martínez-Ruíz, y del lado derecho se observan fotografías tomadas en campo que coinciden con lo descrito.

#### 4.4 Hidrogeología

Dentro del acuífero de San Luis Potosí se distinguen diferentes topofomas, existe un valle tectónico que se refiere a una depresión rectangular que se prolonga hasta el graben de Villa de Reyes, y al norte, rumbo a Villa de Arista se encuentra limitado por fallas con rumbo de N-S, y se considera que el colapso alcanza hasta los 500 metros. Al occidente y suroccidente se encuentran sierra de elevación intermedia que se refiere al bordeado de la Sierra de Álvarez, formada por rocas volcánicas con un relieve abrupto a moderado; el valle queda separado por la zona hidrogeológica de Villa de Arista por un pilar vulcano-tectónico denominado Alto “La Melada” (CONAGUA, 2020).

La zona geohidrológica del valle de Villa de Arista (Figura 21) tiene un sistema de acuífero que se encuentra alojado en el material aluvial y sedimentos lacustres que rellenan esta fosa tectónica. Se consideran impermeables las paredes laterales, así como el piso rocoso, ya que son formaciones calcáreo-arcillosas; el espesor de este acuífero va de 100 m a 250 m.

La zona de recarga se da principalmente al occidente del valle, y se extiende aproximadamente 40 km, actualmente se tiene una recarga adicional que es inducida por la filtración de retornos de riego; y la descarga se da a través de la extracción de bombeo que se concentra mayormente en el poblado de Villa de Arista.

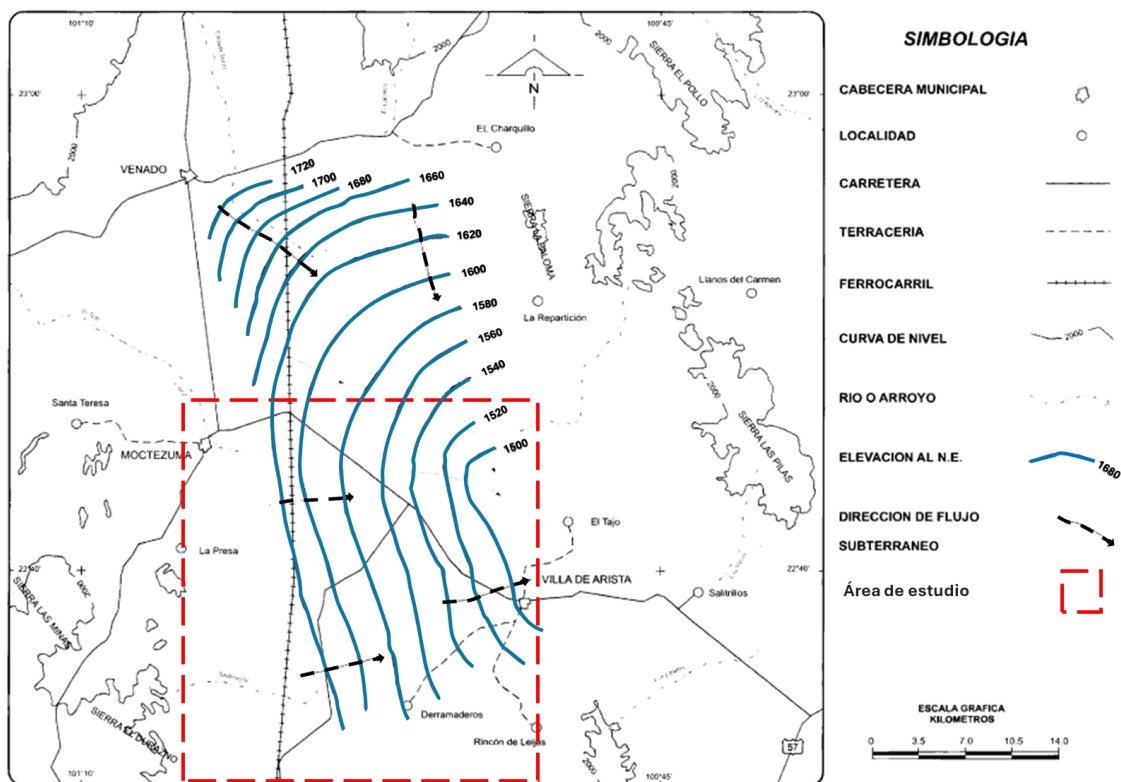


**Figura 21.** Zona de estudio en el acuífero de Villa de Arista.

Los escurrimientos son contenidos total o parcialmente por el acuífero, son intermitentes, es decir, que su caudal se presenta de manera local en la temporada de lluvias, y que no existe un caudal base que se obtenga de la descarga de agua subterránea, su tipo de drenaje es dendrítico con rocas de resistencia uniforme; básicamente la totalidad de los cuerpos de agua ubicados

dentro del acuífero son de tipo intermitente, que no se alimentan de agua del subsuelo, sino de la temporada de lluvias (DOF, 2015).

INEGI (2002) describe que la profundidad del nivel estático en el año de 1997 variaba de los 10 a 110 m, siendo al sureste del municipio de Venado el mínimo valor, en cambio, se incrementa la máxima profundidad al sureste del poblado de Villa de Arista. La evolución del nivel estático en el periodo de 1971 a 1996 se divide en dos zonas, al este de Venado varía de 0 a -20 m, y en la parte restante del Valle de Villa de Arista el abatimiento es nulo, de 0.0 m en el sur, en la Delegación de Bocas un abatimiento mínimo de -6 m. Es decir, que, desde estos puntos, la evolución negativa se incrementa hacia el este, hasta registrar -60 m, a inmediaciones del poblado de Villa de Arista (Figura 22).



**Figura 22.** Plano del Valle de Villa de Arista (Evolución del Nivel Estático 1996). Tomada de INEGI (2002) y modificado.

CONAGUA (2020) menciona que los abatimientos acumulados entre los años 1971 a 1981 varían entre 2 y 13 metros, y algunos descensos puntuales de hasta de 18 m.

# CAPÍTULO V. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la descripción de la metodología que fue llevada a cabo para este proyecto, desde la obtención de un número de fallas por un navegador geográfico y fotografías aéreas para detección de características de las fallas, con drones; así como de una técnica geofísica aplicada a la ingeniería, en este caso la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), que ayuda a determinar la resistividad y conductividad de las rocas y suelos. Para ello se comentarán los materiales y el proceso llevado a cabo para la obtención final de las fotografías y datos geofísicos.

## 5.1 Materiales

### 5.1.1 Google Earth

Entre las características más importantes en el uso de Google Earth para la investigación científica está la medición de distancias geográficas, así como ver la altura de montañas, detección de fallas o volcanes, deslizamientos o estructuras geológicas, gracias al cambio de vistas que tiene tanto de forma vertical como horizontal (Ecured, 2022).

La aplicación de este sistema en el presente trabajo fue para la identificación de las posibles fallas que se encontraban dentro de la zona de estudio, pudiendo visualizar diferentes alineamientos que se asemejaban a fallas del terreno, comparaciones con fotografías de años anteriores al más actual registrado, así como la obtención de diferentes características de estas estructuras.

### 5.1.2 Drones

Los drones son plataformas aéreas que se utilizan para la observación en alta resolución espacial y temporal, son utilizados en distintos ámbitos, como en: fotografía, fotogrametría, topografía, geología, meteorología y publicidad; por lo que existen diferentes tipos de drones, que depende de su tipo y peso para ser utilizados en cualquiera de estas disciplinas (Ortega, 2015).

Este dispositivo fue utilizado en campo para implementar la fotogrametría, es decir, la toma de fotografías aéreas que ayudaran a observar de mejor manera las fallas de interés, que se pudieron sobrevolar en la zona de estudio y tener imágenes detalladas de cómo se encontraba en campo.

Estas son las especificaciones del dron utilizado en campo (Tabla 3 y Figura 23):

**Tabla 3.** Especificaciones del Dron utilizado para este trabajo de investigación. Fuente: DJI (2023)

Modelo	DJI Mini 2
Peso de despegue	<249 g

Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	4000 m
Sistema de navegación por satélite global (GNSS)	GPS+GLONASS+GALILEO
Estabilizador intervalo de vibración angular	$\pm 0.01^\circ$
Estabilizador en rango mecánico	Inclinación: de $-110^\circ$ a $35^\circ$
Cámara con sensor	1 / 2.3" CMOS
Velocidad de obturación	4-1/8000 s
Velocidad máxima	16 m/s
Tiempo máx. de vuelo	31 min



**Figura 23.** Imágenes ilustrativas del dron. Utilizado para este trabajo de investigación, modelo: DJI Mini 2. Fuente: DJI (2023).

### 5.1.3 Equipo Geofísico

Para la cuestión geofísica se utilizó un equipo para la generación de datos de prospección geoelectrica, el cual fue un resistivímetro SuperSting, modelo R8/IP/SP (Figura 24), funciona como instrumento para medir resistividad, polarización inducida (PI) y potencial espontáneo (SP), cuenta con memoria de almacenamiento de datos y ciclos de medición que pueden ser definidos por el usuario (Advanced Geosciences, 2023), cumpliendo con las siguientes especificaciones (Tabla 4):

**Tabla 4.** Especificaciones del resistivímetro SuperSting R8. Fuente: Advanced Geosciences (2023).

Concepto	Descripción
<b>Rango de medición</b>	$\pm 10$ V p-p
<b>Resolución de medición</b>	Mex 30nV; depende del nivel de voltaje
<b>Tiempo de ciclos PI</b>	0.5, 1, 2, 4 y 8 segundos
<b>Ciclos de Medida</b>	Ciclo automático se detiene cuando los errores de la lectura caen por debajo de los límites establecidos por el usuario o el ciclo máximo establecido.
<b>Configuraciones</b>	Manual: Resistencia, Schlumberger, Wenner,

<b>soportadas</b>	Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo y Polo-Polo. Automático: Cualquier configuración se puede programar utilizando comandos.
<b>Fuente de alimentación en campo</b>	12V o 2x12V DC fuente de alimentación externa. Conector en el panel frontal. Motor generador y fuente de alimentación opcional AC/DC.
<b>Tiempo de funcionamiento</b>	Depende de las condiciones y el tamaño de las baterías usadas en el momento del estudio.
<b>Peso</b>	10.9 kg



**Figura 24.** Equipo SuperSting R8.



## 5.2 Metodología

La metodología para llegar a los resultados de este trabajo fue realizada en diferentes etapas, que se pueden visualizar de manera general en la figura 25, y también la descripción detallada de cada una de ellas, con su material y método empleado:

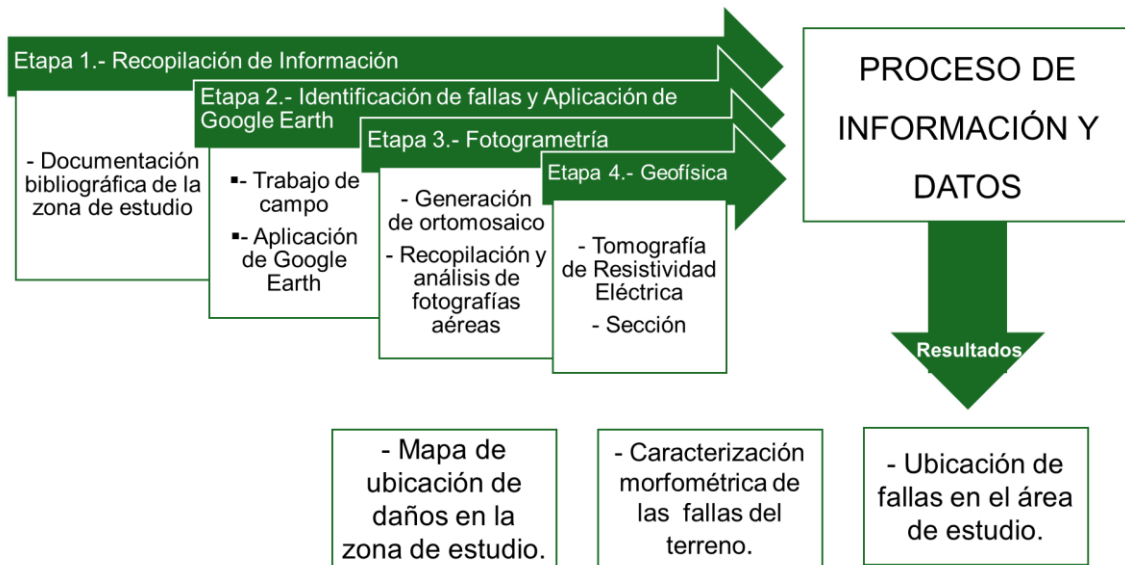


Figura 25. Diagrama de etapas de la metodología.

### 5.2.1 Etapa 1. Recopilación de información

#### ➤ Documentación bibliográfica de la zona de estudio

Con la confirmación de la existencia de las fallas, el siguiente paso fue buscar información sobre la zona de estudio, ya que es necesario obtener los fundamentos teóricos y casos representativos que ayuden a la comprensión de lo que sucede en el lugar.

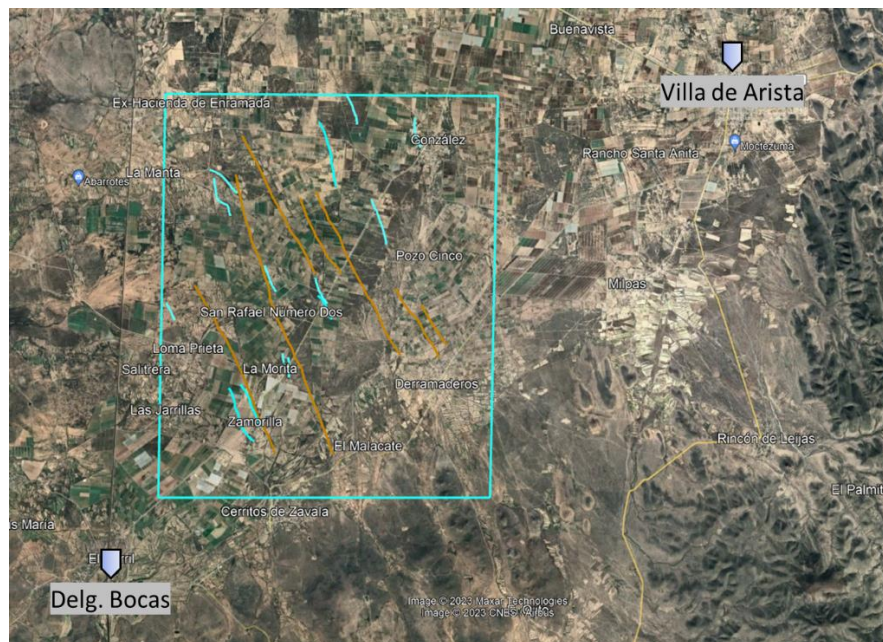
Con el fin de comprender la zona de estudio se consultaron trabajos previos y reportes acerca de la aparición de las fallas del terreno, la geología del lugar, tanto regional como local, así como de su hidrología, tectónica y antecedentes históricos que pudieran ayudar a entender un poco más el comportamiento del terreno.

La consulta y documentación de todo el material de apoyo fue principalmente de artículos científicos, de reportes por parte de Protección Civil Estatal, folletos técnicos, tesis, informes y divulgación, como consecuencia de toda esta documentación nos permitió generar un análisis más actualizado sobre la aparición de las fallas, así como de su comportamiento, extensión y apertura, llegando también a los problemas relacionados con estas estructuras en la zona de estudio.

## 5.2.2 Etapa 2. Identificación de fallas y aplicación de Google Earth

### ➤ Trabajo de campo

Antes de comenzar a estudiar la zona de estudio, fue necesario visitar el área de interés, ya que se tenía un previo registro de fallas en una zona que abarcaba de la Delegación de Bocas al municipio de Villa de Arista (Figura 26), por lo se propuso verificar la existencia de algunas de estas fallas, que pudieran ser observadas a simple vista, en este caso se pudieron identificar sobre el camino Ahualulco-Corazón de Jesús.



**Figura 26.** Mapa de ubicación de fallas basado en datos de Protección Civil Municipal de San Luis Potosí. Las líneas de color café son fallas identificadas en el año 2003, y las líneas de color azul son fallas identificadas en el año del 2017.

### ➤ Aplicación de Google Earth

Una vez que se verificó la existencia de estas fallas, y habiendo tomado puntos de georreferencia en la primera visita a campo, el siguiente paso fue pasar esta información al navegador geográfico Google Earth, con el fin de visualizar de una manera más completa las fallas y hasta proyectar su posible alineamiento y/o extensión de longitud (Figuras 27 y 28).



**Figura 27.** Fallas detectadas en campo a simple vista por visualización en Google Earth.



**Figura 28.** Acercamiento de las fallas. De tamaño pequeño que se detectaron en campo.

### 5.2.3 Etapa 3. Fotogrametría

Una de las propuestas principales para realizar esta investigación fue el uso de medios tradicionales (imágenes satelitales), sin embargo, esta opción era inadecuada dada la escala y precisión con la que se quería trabajar en este caso, por lo que se consideró la opción de adquirir esta información por medio de un UAV (vehículo aéreo no tripulado), o como comúnmente se conocen, drones, para así poder obtener imágenes aéreas de la zona de estudio que cumpliera con las características requeridas.

Como se mencionó en los materiales, fui utilizado un dron de la marca DJI mini 2 para la toma de fotografías aéreas de alta resolución en las fallas seleccionadas, el dron brinda la toma de ortofotos, es decir, que gracias a sus sensores se toman fotografías georreferenciadas de alta resolución y medición de altitud,

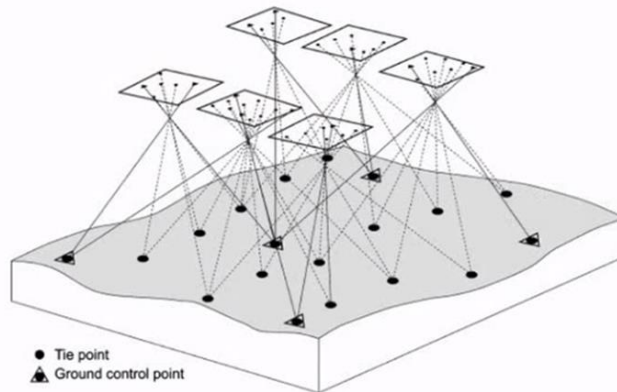
Para la estrategia de la toma de fotografías aéreas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Seleccionar las estructuras que se van a fotografiar.
- Orientación de las imágenes
- Tiempo de captura entre cada fotografía tomada
- Duración de la batería
- Clima
- Topografía
- Vegetación

Tomando en cuenta lo anterior, Pérez-Álvarez (2001), le llama “Proyecto de vuelo” al conjunto de todos los cálculos y consideraciones previas para la realización de un vuelo fotogramétrico; para el cumplimiento del objetivo de este proyecto de vuelo se tomaron cuestiones muy importantes, como que el dron debe volar a una altitud constante, con una ruta predeterminada, así como a una velocidad constante, para realizar las tomas con intervalos regulares (Tabla 5), y con ello cubrir con imágenes la zona de interés, por lo que las tomas anteriores y las contiguas deben tener una zona en común, a la que se le llama “zona de recubrimiento” (Figura 29).

**Tabla 5.** Parámetros del Proyecto de Vuelo. El software utilizado para este trabajo es Pix4D.

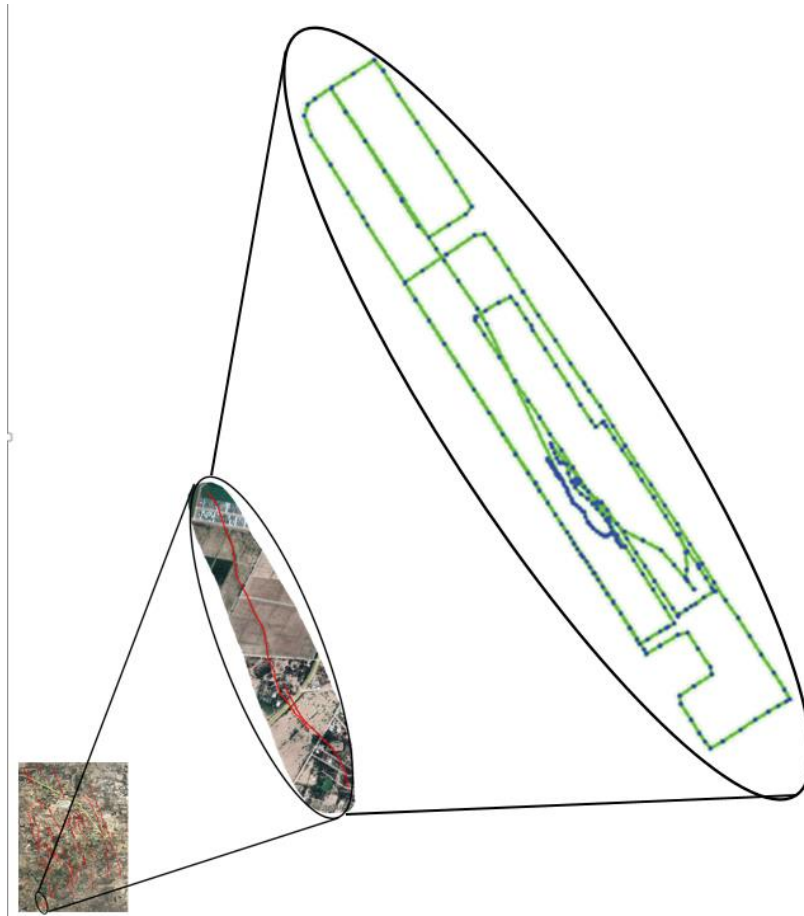
PARÁMETROS	RESULTADOS
DISTANCIA MEDIA DE MUESTREO A PARTIR DEL SUELO	2.36 cm /0.93 pulg.
ÁREA DE COBERTURA IMÁGENES	0.123 km <sup>2</sup> / 12.2882 ha
CONJUNTO DE DATOS	34573 puntos clave por imagen 263 de 288 imágenes calibradas (91%), todas las imágenes habilitadas en 3 bloques
OPTIMIZACIÓN DE LA CÁMARA	10.26 % de diferencia relativa entre los parámetros iniciales y los optimizados por la cámara.
MATCHING	Media de 10995 coincidencia por imagen calibrada



**Figura 29.** Esquema de ejemplo del proceso de vuelo para cubrir la zona de estudio.

Gracias a esta metodología se pudo obtener el proyecto de vuelo de una de las fallas de interés, que es de las primeras que se encuentra en el camino de Ahualulco - Corazón de Jesús, que tiene el nombre de “Bocas 1”, obteniendo el siguiente resultado en la figura 30, pudiendo observar la ruta del dron; el proceso de todos los puntos y fotografías tomadas se realizó con el programa Pix4D Mapper.

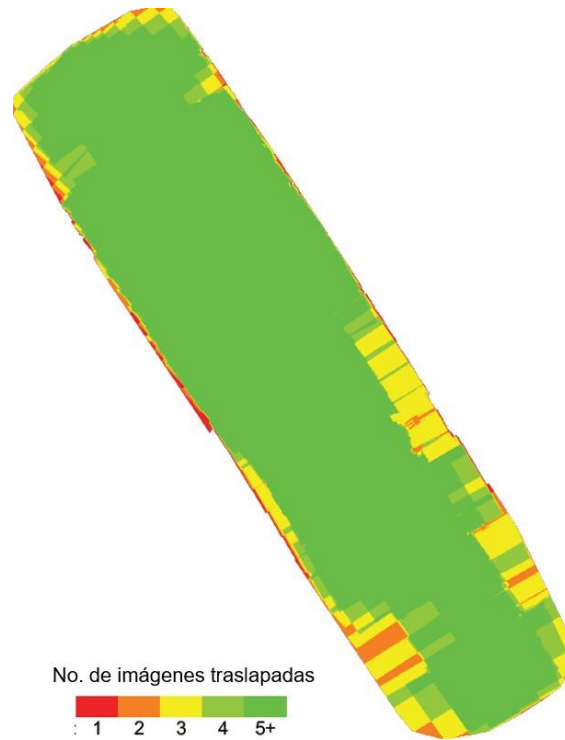
Debido a diferentes cuestiones solo se pudo obtener un vuelo con esta calidad ya que la principal afectación por no obtener un mayor número de vuelos completos, fue la batería del dron y el clima, ya que con el viento es muy difícil obtener los buenos parámetros para obtener una buena zona de recubrimiento.



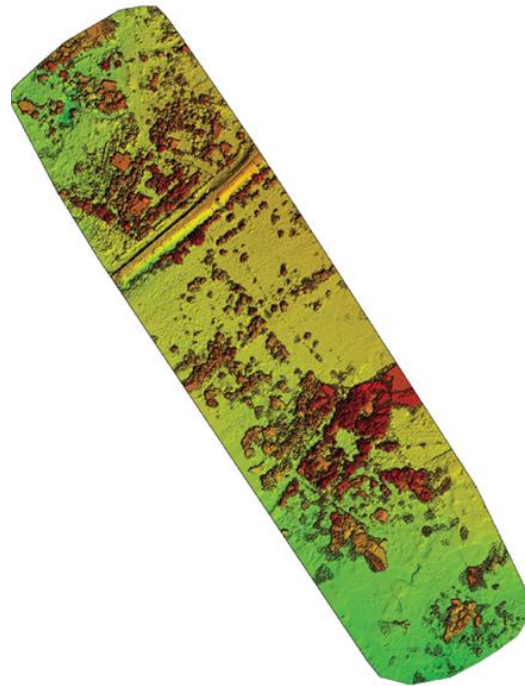
**Figura 30.** Proyecto de vuelo de la Falla “Bocas 1”. La línea verde sigue la posición de las imágenes en el tiempo a partir del punto azul grande.

El siguiente paso en el proceso de las fotografías aéreas o fotogrametría, es la superposición de imágenes (Figura 31), hecho con el programa Pix4D Mapper o a lo que se le llama como traslape, con los siguientes pasos:

- Primer paso: calibración, orientación, correcciones que se realizan manualmente, así como el emparejamiento de puntos clave de las imágenes adquiridas. Tomando en cuenta la trayectoria de vuelo, el traslape que se realizó, la velocidad, tipo de sensor y la altura con la que se voló.
- Se obtiene la Nube Densa de Puntos.
- Se realiza el Modelo Geométrico, que es la integración de datos, la estructura, generación y modificación de la malla, así como la corrección de agujeros y/o segmentación.
- También se obtiene un Modelo Digital de Superficie Dispersa, que consta básicamente de un mapa de textura y relieve (Figura 32).
- Y como punto final se obtiene el Modelo Digital Realista Texturizado de Alta Resolución Espacial.



**Figura 31.** Esquema de traslape de fotografías aéreas y su grado de coincidencia. Calculadas para cada píxel del ortomosaico. Las áreas rojas y amarillas indican un bajo solapamiento para el cual se pueden generar malos resultados. Las áreas verdes indican una superposición de más de 5 imágenes por cada píxel. Se generarán resultados de buena calidad siempre y cuando el número de coincidencias de puntos clave también sea suficiente para estas áreas.



**Figura 32.** Modelo Digital de Superficie Dispersa (DSM). (Vegetación).

#### 5.2.4 Etapa 4. Geofísica

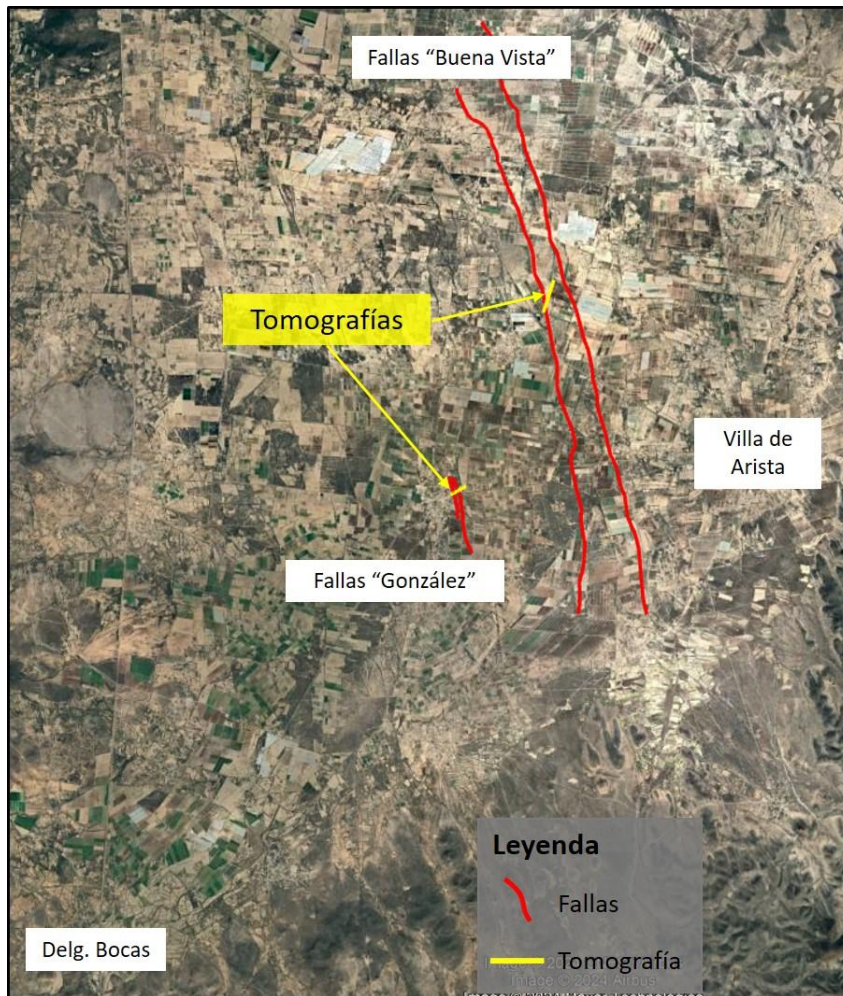
En esta investigación fue utilizado el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), y consiste en determinar las variaciones de resistividad eléctrica de las rocas y suelos, es decir, la medición de materiales que conforman el subsuelo donde se muestran ciertos rangos de valores de resistividad dependiendo de su composición, contenido de agua o sales disueltas, así como la presencia de fracturas en las rocas y/o la porosidad del suelo, por ello la respuesta sería anómala al paso de corriente.

Se realizaron un total de dos tomografías, con el equipo SuperSting™, que consta de una unidad central donde se controlan los procesos de adquisición de datos de forma automática, en la cual también se puede observar la inyección de corriente y el potencial eléctrico, se cuenta con un accesorio llamado *Switchbox*, es, decir, un conmutador que se encarga de ejecutar todas las combinaciones de electrodos e impulsos eléctricos para los diferentes métodos programados en la computadora, en este caso Dipolo-Dipolo. Este equipo además debe de contar con una fuente de poder (batería), en este caso con baterías de 12 V cada una de forma paralela, además de que se cuenta con cables de *conexión auxiliares*, además cuenta con *cable eléctrico y electrodos*.

Las tomografías son de una longitud de 550 m, donde se utilizan 56 electrodos con una separación de 10 m cada uno, el equipo se posicionó en el centro de cada perfil, y se pudo alcanzar una profundidad de entre los 100 m hasta los 130 m aproximadamente, donde gracias ello se pudo observar la geología en el subsuelo y el comportamiento de las fallas, gracias a la resistividad medida de los materiales, esta medición se llevó a cabo en unidades Ohm\*m, resultando secciones con valores de resistividad aparente del medio geológico (sección observada).

Para la localización de las tomografías se realizó con base a lo observado en campo, así como en la identificación de fallas en Google Earth, la primera tomografía se ubica cerca de la comunidad de González y la segunda de la comunidad de Buena Vista, entre ambas tomografías existe una distancia de 6.15 km (Figura 33); estas fallas fueron elegidas por diferentes característica, la de “González” por estar cercana una población considerable, así como estar dentro de la longitud que nos permiten los cables utilizados en el equipo de medición, y la falla de “Buena Vista” se eligió por estar dentro de un campo de siembra y de fácil acceso para su medición, así como el interés por su longitud tan grande.





**Figura 33.** Mapa de ubicación de tomografías realizadas en campo.

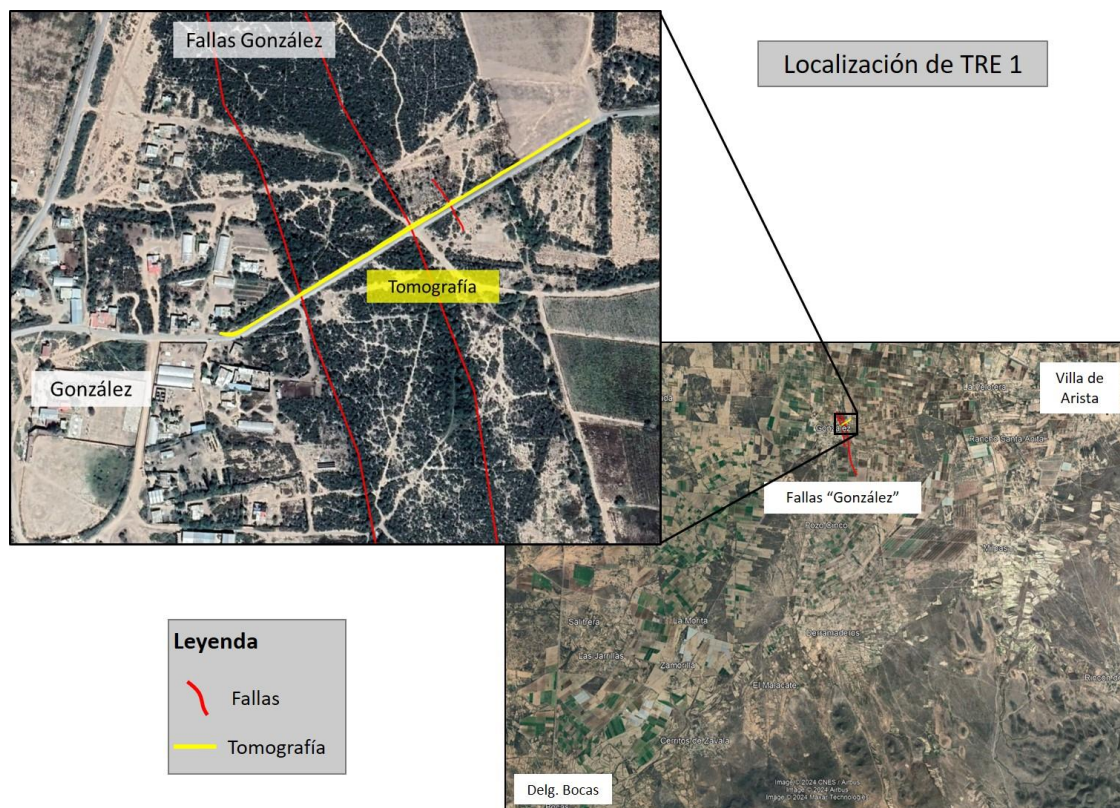
Estos dos perfiles fueron seleccionados por atravesar las zonas donde aparecen fallas, con el fin de observar el cambio de resistividad en el material geológico, el comportamiento de las fallas en este material, así como el cálculo de su profundidad.

En el caso de la primera tomografía, en la figura 34 se puede observar la cercanía de las fallas a la comunidad de González, así como la pequeña distancia que existe entre cada una de estas fallas que abarca la tomografía. Y la segunda tomografía que se ubica en las fallas de Buena Vista (Figura 35) fue tomada por estar cerca de un invernadero de nombre “Santa Rita S.A. de C.V.”, así como de atravesar un área de cultivo; ambas tomografías fueron realizadas con el método de Wenner.

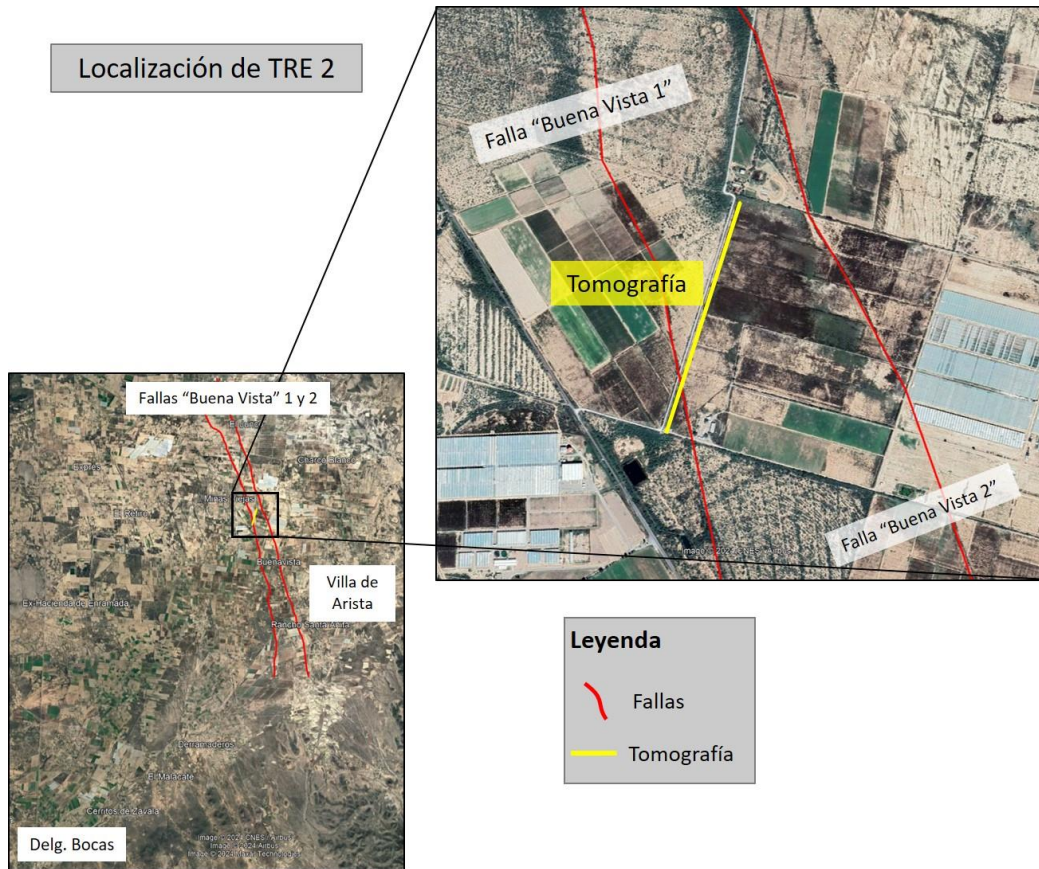
Una vez que se aplicó el método de elección, los datos que se obtuvieron fueron procesados con el algoritmo de inversión Res2DInv (Gauss-Newton), buscando minimizar los valores observados dentro de este algoritmo se aplica el método *smoothnes-constrained least – square* (suavizado), es decir, que de obtener una

seudosección observada, pasar a una sección calculada, que minimice las variaciones espaciales en los parámetros del modelo, modificando entonces la ecuación de Gauss – Newton, por lo que los valores de resistividad cambian de manera gradual y de forma suave en cada interacción.

Existen situaciones geológicas dónde se presentan contrastes muy altos de resistividad, por lo que se emplea el método de *inversión robusta*, es decir, modifica la inversión para controlar los cambios de los valores absolutos del modelo de resistividad, posteriormente los resultados fueron exportados al software SURFER 16 para su edición, obteniendo una representación del subsuelo en perfiles (sección), con una escala de colores que indica las diferentes resistividades del material, así como diferentes características del medio.



**Figura 34.** Localización de TRE 1, en las fallas "González".



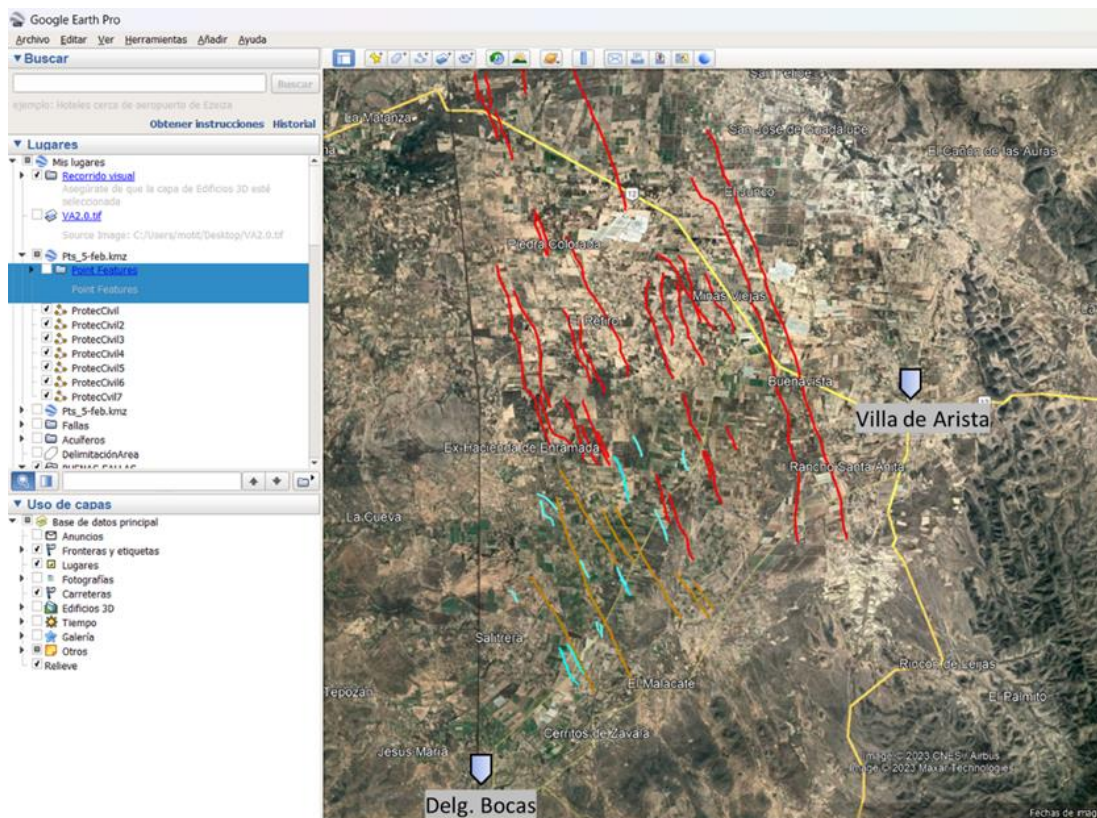
**Figura 35.** Localización de TRE 2, en la falla de "Buena Vista"

# CAPÍTULO VI. RESULTADOS

## 6.1 Identificación de fallas

El área que abarca el presente estudio es de 838.62 Km<sup>2</sup>, con un perímetro de 116.22 km, sitio dónde se han presentado los agrietamientos y fallas, que han sido reportados desde el año 2003 por los pobladores del lugar, así como por parte de la Coordinación de Protección Civil Municipal y Estatal. Estas fallas del terreno han provocado afectación de casas-habitación, infraestructura urbana como las carreteras, y zonas de cultivo.

Como resultado de la visita a campo, así como del uso de los sistemas de información geográfica se trazaron las fallas, y rasgos que tuvieran un comportamiento similar a estas mismas previamente marcadas por Protección Civil Municipal. La cartografía digital de las fallas generó como resultado la siguiente imagen de Google Earth (Figura 36).



**Figura 36.** Imagen de ubicación de las fallas reportadas por Protección Civil Municipal de San Luis Potosí. De color azul (2017) y café (2003); las líneas de color rojo son las fallas identificadas personalmente por medio del uso de Google Earth, siguiendo los patrones de las fallas previamente mapeadas.

Con el uso de esta herramienta se pudieron detectar la probable forma de las fallas, así como la obtención de cierta información de estas mismas (Tabla 6).

**Tabla 6.** Lista de fallas totales encontradas en la zona de estudio con sus principales características.

<b>No.</b>	<b>Nombre de la Falla</b>	<b>Longitud (Km)</b>	<b>Coordenadas (Punto de inicio - Punto Final)</b>	<b>Rumbo</b>
1	Buena Vista 1	17.3	22.753006° / -100.921701° 22.603557° / -100.876184°	N 11° W
2	Buena Vista 2	15.5	22.735703° / -100.928288° 22.603362° / -100.894688°	N 15° W
3	Minas Viejas 1	2.66	22.701107° / -100.924950° 22.679587° / -100.915100°	N 20° W
4	Minas Viejas 2	2.86	22.708088° / -100.934801° 22.683030° / -100.926644°	N 10° W
5	Minas Viejas 3	3.89	22.708851° / -100.943303° 22.680065° / -100.922253°	N 19° W
6	Minas Viejas 4	3.56	22.698360° / -100.936415° 22.668100° / -100.927664°	N 09° W
7	Minas Viejas 5	3.0	22.702152° / -100.941227° 22.675764° / -100.939560°	N 10° W
8	Minas Viejas 6	4.16	22.699892° / -100.947000° 22.664143° / -100.934706°	N 14° W
9	Minas Viejas 7	1.50	22.695777° / -100.954208° 22.682857° / -100.952253°	N 19° W
10	Minas Viejas 8	0.84	22.695841° / -100.956215° 22.684132° / -100.953381°	N 07° W
11	El Retiro	6.23	22.717180° / -100.977927° 22.665564° / -100.957895°	N 18° W
12	El Retiro 2	3.19	22.687370° / -100.974465° 22.660244° / -100.966481°	N 10° W
13	El Retiro 3	3.21	22.691045° / -100.981017° 22.664052° / -100.971465°	N 07° W
14	Piedra Colorada 1	1.94	22.727122° / -100.980084° 22.710492° / -100.985567°	N 08° W

15	Piedra Colorada 2	1.64	22.725080° / -100.989476° 22.710881° / -100.985910°	N 10° W
16	El Sureño	6.45	22.780062° / -100.972469° 22.724966° / -100.954366°	N 16° W
17	Piedra Azul 1	4.99	22.698965° / -100.999629° 22.656281° / -100.987645°	N 11° W
18	Piedra Azul 2	7.64	22.708323° / -101.005463° 22.642544° / -100.988813°	N 07° W
19	Piedra Azul 3	2.71	22.661023° / -100.991204° 22.640892° / -100.979682°	N 22° W
20	ExHENramada 1	2.56	22.659435° / -100.982161° 22.637144° / -100.976354°	N 09° W
21	ExHENramada 2	1.77	22.649506° / -100.976424° 22.635166° / -100.970028°	N 12° W
22	ExHENramada 3	2.83	22.659041° / -100.975350° 22.629504° / -100.963744°	N 14° W
23	ExHENramada 4	1.12	22.646705° / -100.970072° 22.636919° / -100.966140°	N 15° W
24	González 1	2.28	22.658173° / -100.936086° 22.640430° / -100.929258°	N 24° W
25	González 2	1.32	22.646152° / -100.920368° 22.635366° / -100.915547°	N 20° W
26	González 3	2.19	22.637533° / -100.928740° 22.618400° / -100.923287°	N 14° W
27	González 4	1.36	22.638305° / -100.930149° 22.626502° / -100.926680°	N 14° W
28	González 5	1.92	22.626455° / -100.935527° 22.609919° / -100.931242°	N 09° W
29	Pozo Cinco 1	3.16	22.624569° / -100.944486° 22.597700° / -100.935158°	N 13° W
30	Pozo Cinco 2	3.21	22.640017° / -100.949302°	N 10° W

			22.611748° / -100.943992°	
31	Pozo Cinco 3	3.62	22.625240° / -100.953070° 22.594937° / -100.941072°	N 19° W
32	Pozo Cinco 4	2.95	22.611139° / -100.952700° 22.586588° / -100.942949°	N 08° W
33	Pozo Cinco 5	2.72	22.595674° / -100.951985° 22.573372° / -100.941400°	N 19° W
34	Rancho 1	1.85	22.783623° / -100.992007° 22.767433° / -100.989477°	N 04° W
35	Rancho 2	1.18	22.777774° / -101.009611° 22.767237° / -101.008746°	N 05° W
36	Rancho 3	1.79	22.778594° / -101.004736° 22.762824° / -101.003823°	N 05° W
37	Rancho 4	2.44	22.769342° / -101.007647° 22.753105° / -101.002316°	N 15° W
38	Rancho 5	3.42	22.769782° / -101.001780° 22.737257° / -100.995927°	N 05° W
39	Bocas 1	1.27	22.569650° / -100.989289° 22.559052° / -100.985187°	N 18° W
40	Bocas 2	0.61	22.561008° / -100.986220° 22.556400° / -100.983473°	N 20° W
41	Bocas 3	1.81	22.568948° / -100.984657° 22.554284° / -100.977765°	N 07° W
42	La Morita 1	3.91	22.604369° / -100.979964° 22.570236° / -100.972149°	N 05° W
43	La Morita 2	0.81	22.579132° / -100.973902° 22.572037° / -100.973411°	N 06° W
44	La Morita 3	1.1	22.584523° / -100.970499° 22.576051° / -100.966278°	N 24° W
45	La Manta 1	3.50	22.636229° / -100.987877° 22.605849° / -100.982620°	N 17° W

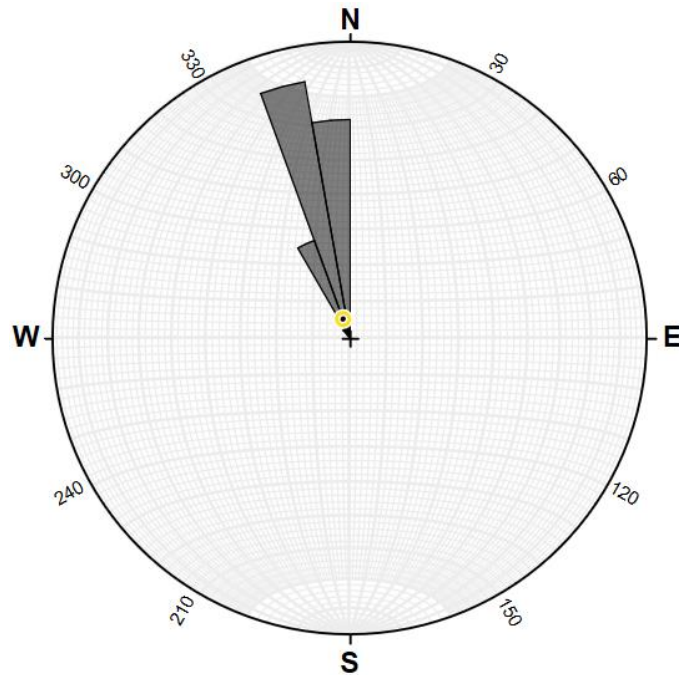
46	La Manta 2	3.30	22.634457° / -100.984613° 22.607592° / -100.972523°	N 19° W
47	La Manta 3	2.85	22.633565° / -100.982942° 22.611058° / -100.969962°	N 21° W
48	La Manta 4	2.64	22.642289° / -100.965679° 22.619670° / -100.958667°	N 23° W
49	La Manta 5	2.13	22.653358° / -100.958893° 22.635131° / -100.953070°	N 21° W
50	Soledad 1	1.1	22.653750° / -100.944264° 22.645515° / -100.938910°	N 25° W
51	Soledad 2	0.56	22.652972° / -100.942062° 22.648678° / -100.969285°	N 33° W
52	Nave	0.96	22.595839° / -100.965828° 22.588357° / -100.961563°	N 24° W
53	Palmar	3.0	22.612367° / -100.918610° 22.585262° / -100.914442°	N 05° W
54	El Mezquite	1.43	22.662724° / -100.923742° 22.650579° / -100.919554°	N 25° W
55	Exprés	0.55	22.717787° / -101.002241° 22.713474° / -100.999832°	N 20° W
56	Exprés 2	1.62	22.713879° / -100.999329° 22.700352° / -100.993811°	N 19° W
57	La Peque	0.70	22.634802° / -100.927058° 22.634246° / -100.926737°	N 16° W

Resultó un total de 57 fallas identificadas e interpretadas dentro de AFABA (Figura 46), este conjunto de fallas presenta longitudes muy variantes que van desde los 550 m hasta los 17.3 km, por lo que tuvo un total de 170.96 kms lineales de fallas en la zona de estudio, con un rumbo preferencial al noroeste hasta casi llegar de norte a sur; los nombres se propusieron por la cercanía a las localidades o comunidades con las fallas del lugar.

Se midieron las direcciones de las fallas encontradas, para después graficarse en una roseta por medio del programa Stereonet, esto con el fin de identificar la frecuencia de la dirección en dichas fallas (Figura 37), dando como resultado una



similitud con las direcciones que presentan otros autores para las fallas del graben Arista-Ahualulco, es decir, que van de N-S, NW/SE.

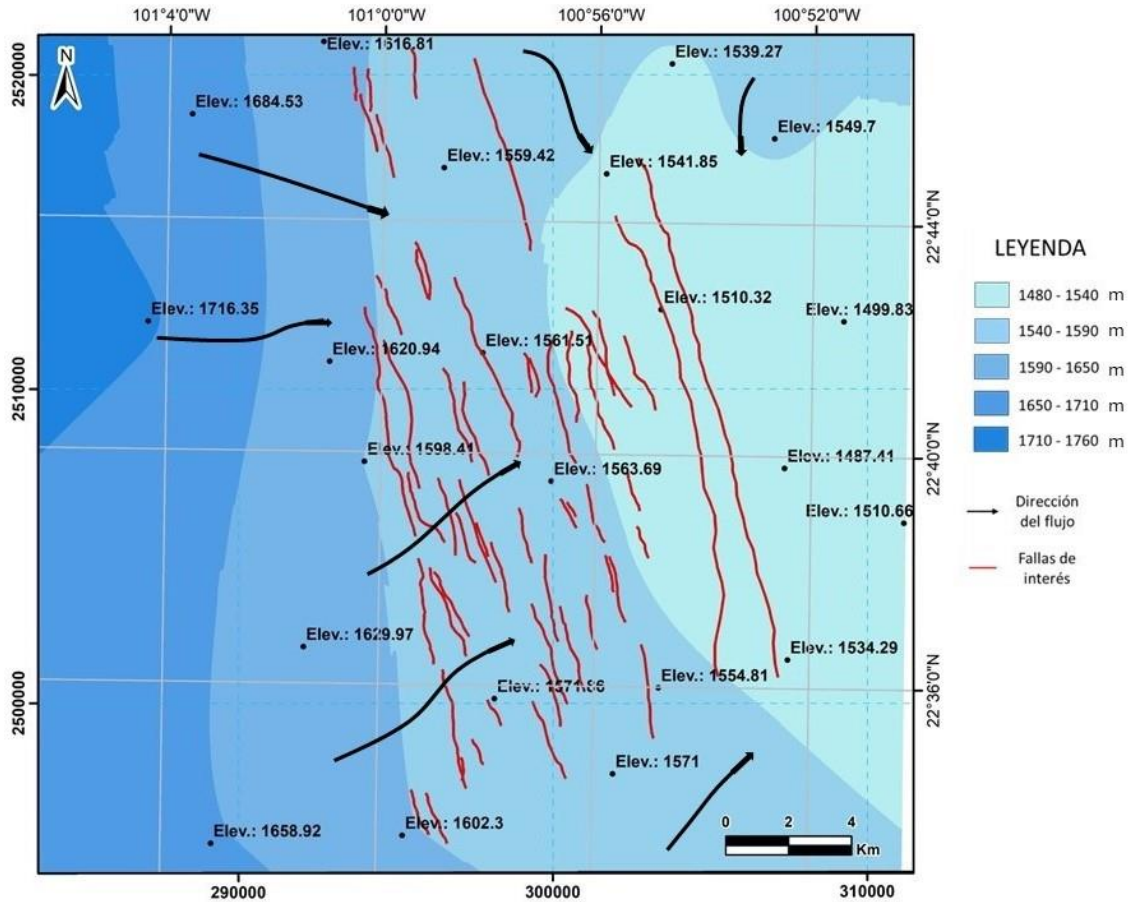


**Figura 37.** Diagrama de frecuencias de los lineamientos de las fallas de interés.

Como se observó en la figura 36, en el año 2003 se tuvo un registro de 7 fallas, y en el año del 2017 se registraron 13 fallas nuevas, y en el actual trabajo se identificaron 37 fallas nuevas, de estas solo 7 pudieron ser verificados en campo, y las 30 restantes se verificaron con fotointerpretación de imágenes ópticas en Google Earth.

Las fallas que se encuentran en la zona de interés son semi-perpendiculares al cono de abatimiento (Figura 38), cortando la dirección de flujo, asumiendo que el posible origen de las fallas sea tectónico, sin embargo, no se descarta el hecho de que actividad antropogénica acelera su aparición, así como su desarrollo, esto debido a la compactación de material granular que pierde presión en los poros por la extracción excesiva de agua del acuífero.

Los datos con los que se ha creado el mapa para observar el comportamiento de las fallas en relación con la dirección de flujo, fueron tomados del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) del año más reciente encontrado que fue de 1996.



**Figura 38.** Mapa del cono de abatimiento. Creado a partir de datos de la *elevación del nivel estático*, datos que fueron consultados por el REPDA, del año de 1996; resaltando la dirección de flujo.

Poland y Davis (1969) y Figueroa Vega (1989) observaron que en campos agrícolas la extracción de agua para riego a gran escala produjo múltiples fisuras lineales por lo que concluyeron que eran ocasionadas por abatimientos de agua subterránea.

## 6.2 Aplicación de Fotogrametría

Aplicando los conocimientos básicos de la fotogrametría y gracias a un conjunto de datos geospaciales se pudieron obtener imágenes aéreas a través de un dron modelo DJI Mini 2, con cámara multispectral de resolución 4K, así como la obtención de un ortomosaico (Figura 39), resultado de 288 fotografías aéreas, realizado en un solo vuelo, donde la toma de fotografías aéreas fuera lo más precisa posible.



**Figura 39.** Ortomosaico resultante de la falla "Bocas 1". Este es el resultado de la metodología aplicada en el presente proyecto.

Como parte de la investigación se realizó una comparativa entre ambas herramientas, la misma falla tomada desde la percepción de Google Earth, y el resultado del proceso de la fotogrametría (Figura 40), esto con el fin de observar las diferencias entre cada uno, sin embargo, a simple vista parecería que no existe una gran diferencia, solo la alta resolución del ortomosaico, pero el detalle es en la forma en que uno puede visualizar la misma imagen en una distancia más cercana (Figura 41).



**Figura 40.** Imagen de comparación. Captura tomada en Google Earth (A), a diferencia del resultado de la fotogrametría en un ortomosaico que muestra una mejor resolución (B).



**Figura 41.** Imagen diferencial de resolución. Lado izquierdo de Google Earth en el año 2024, lado derecho fotografía aérea tomada por dron en el año 2021.

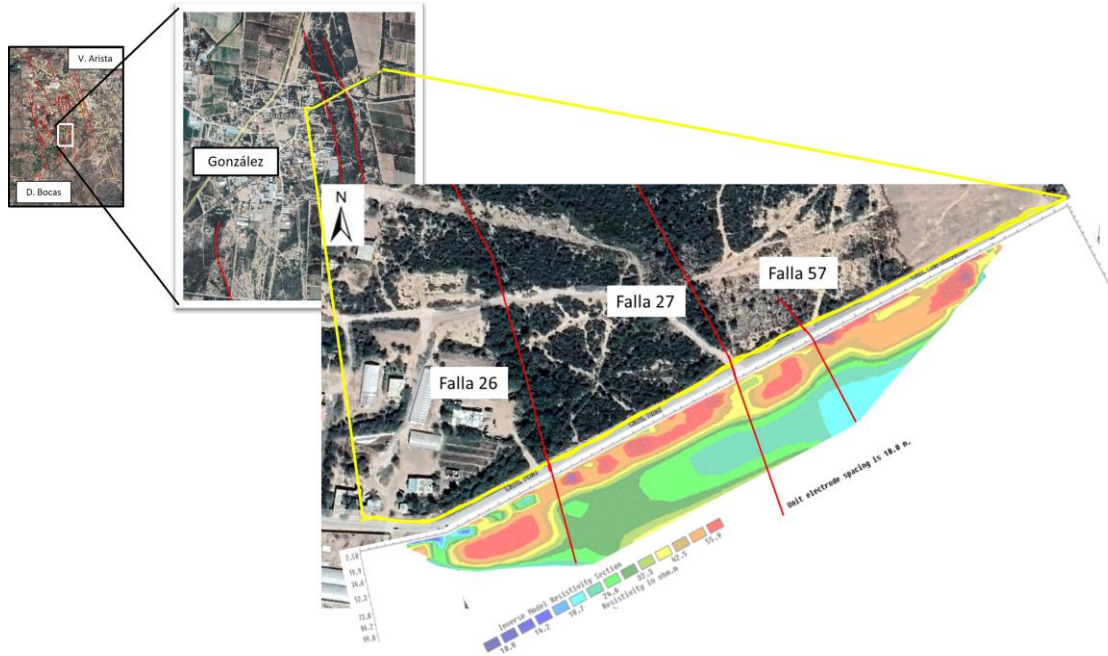
### **6.3 Resultado de Tomografías de Resistividad Eléctrica**

Se realizaron 2 tomografías, una ubicada cerca de la comunidad de González y la segunda ubicada en la comunidad de Buena Vista, esto con el propósito de diferenciar u obtener similitudes en los resultados de cada una de las tomografías, con el fin de adquirir información más detallada del lugar donde se encontraban las fallas.

Para complementar este trabajo de investigación se realizó un levantamiento de resistividad eléctrica a mayor profundidad por lo que se utilizó el método de Wenner para las tomografías de “González” y “Minas Viejas”, debido a esto se implementó el equipo SuperSting™ para obtener una profundidad considerable para aumentar la información procesada con el software de Res2DInv y obtener mejores resultados del levantamiento de resistividad.

#### **6.3.1 Tomografía “González”**

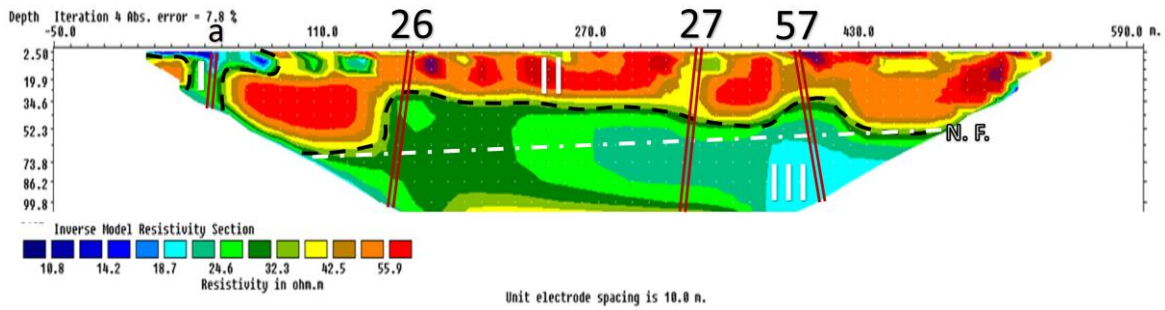
Esta tomografía fue tomada paralela (en la orilla) a la Carr. Los González, que sale de la comunidad de González, esta carretera llega a la carretera estatal No. 12. Se decidió realizar el estudio en este sitio ya que cruzan 3 fallas, fueron identificadas anteriormente por medio de Google Earth, aparte de que representan un riesgo por la cercanía a esta comunidad. En la figura 42 se puede observar como la tomografía es transversal a la dirección de las fallas, con el propósito de observar el comportamiento geológico sub-superficial, observando así las fallas con No. 26, 27 y 57 (véase Tabla 6).



**Figura 42.** Ubicación de la tomografía “González” con respecto a las fallas. La numeración de las fallas corresponde a la Tabla 6.

En la figura 43 podemos observar la tomografía de “González” a mayor detalle, dónde se puede interpretar que existen 3 capas isorresistivas, la primera capa (I) es discontinua y muestra resistividades de 10 a 24 Ohm/m, es decir, se relaciona con material Arcillo-Arenoso, con un espesor de 16 m de profundidad, para la segunda capa (II) se observa una mayor resistividad, que va de los 40 a 60 Ohm/m, que se podría relacionar con un posible Paleocanal con presencia de conglomerado, de un espesor de 50 m y se distribuye desde la falla 26 hasta la falla 57, abarcando gran parte del perfil, con algunas interrupciones debido a la presencia de estas fallas; de los 50-100 m de profundidad se encuentra la tercera capa (III) con resistividades de 18 a 45 Ohm/m, se interpreta como una capa saturada (zona saturada) y es la más profunda que se alcanzó por los valores de resistividad, es en esta zona dónde se puede representar con una línea punteada de color rojo el *nivel freático*, dónde se podría interpretar que corresponden a Arenas-Conglomerado, la saturación posiblemente sea consecuencia por las infiltraciones de agua que se tienen por las fallas presentes.

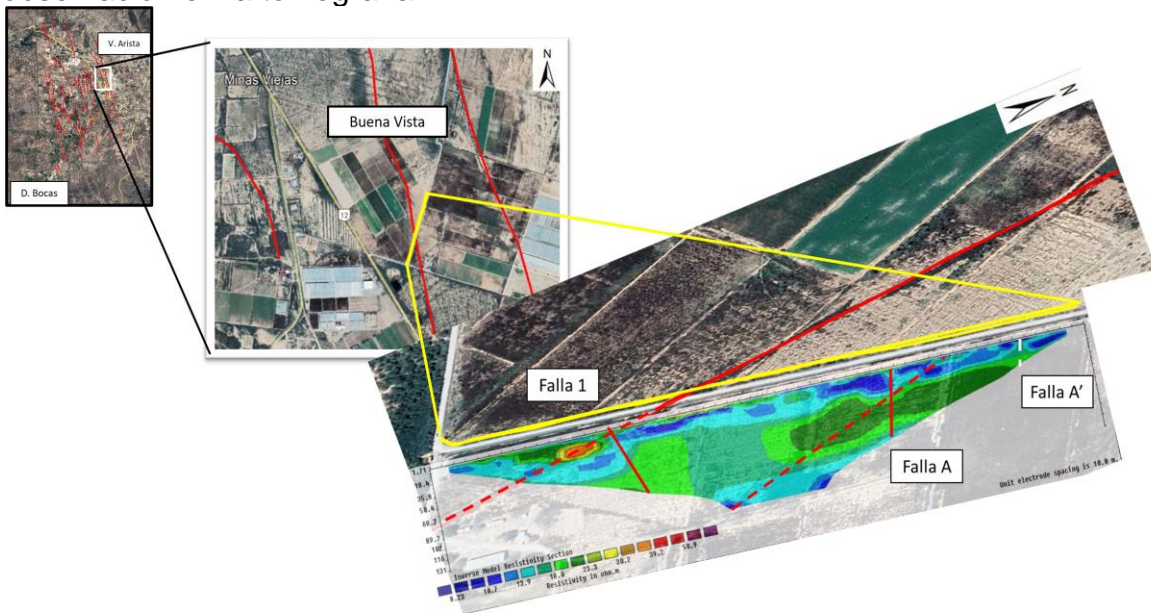
Con relación a la presencia de las fallas en el perfil se puede interpretar lo siguiente: a 20 m de distancia del nivel freático, en la falla 26 se observa un levantamiento hidráulico que se asocia a esta falla, al igual que en el caso de la falla 57 donde se forma un pequeño domo, en cambio en la falla 27 no es tan grande el cambio debido a que hay una menor abertura de falla. Cabe mencionar que la Falla 26 se encuentra a una distancia de 50 m de una zona de agricultura por riego, lo cual estaría induciendo esta recarga artificial (Figura 43).



**Figura 43.** Tomografía “González”. Las líneas rojas representan la ubicación de las fallas (y su número correspondiente), la línea blanca punteada representa el nivel freático (N.F.), y los números de color blanco indican el número de capas.

### 6.3.2 Tomografía “Buena Vista”

La segunda tomografía fue realizada aproximadamente a 6 kilómetros de distancia de la tomografía “González”, cruzando la carretera estatal No. 12, en una zona de cultivo cerca de la comunidad de Buena Vista, se eligió esta falla para estudio geofísico ya que tiene la longitud más grande encontrada (17.13 km) que se encuentran en la zona de estudio, la tomografía fue tomada de manera transversal a la falla, con una dirección NE-SW (Figura 44), interpretando como resultado 3 fallas 1, A y A’, una previamente identificada y dos interpretadas por observación en la tomografía.



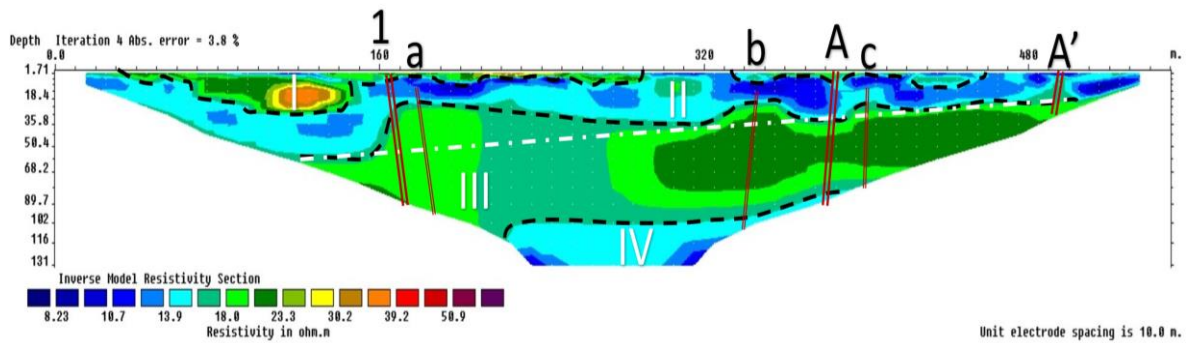
**Figura 44.** Ubicación de la tomografía “Buena Vista” con respecto a las fallas. El número de la falla corresponde a la Tabla 6, y las letras A y A’ se utilizaron para señalar las posibles fallas que se encuentran debajo de la superficie, sin observarse por encima.

La figura 45 es el resultado de la tomografía de la falla Buena Vista 1, en la que se puede interpretar la existencia de cuatro unidades resistivas, la primera unidad (I) consiste de 23.3 a 40 Ohm/m, se distribuye de lado izquierdo en una pequeña parte del perfil y tiene un espesor de 20 m de profundidad, la unidad dos (II),

muestra resistividades de 10 a 16 Ohm/m, se distribuye de manera casi superficial a lo largo de la sección, con espesores de hasta 35 m de profundidad. La tercera unidad (III) resistiva va de los 16 a 26 Ohm/m, con un espesor aproximadamente de 80 m y abarca de igual manera todo el perfil por debajo de la unidad II, existe una cuarta unidad (IV) que es la más profunda y se ubica al centro de la sección, con resistividades de 10 a 140 Ohm/m, el nivel freático se ubicó de manera interpretativa a los 50 m de profundidad.

De manera superficial se identificaron 3 fallas, que se encuentran señaladas con el número 1 y letras A y A', y 3 fallas más que se pueden interpretar dentro del perfil geoelectrico con las letras a, b y c, esto como resultado de lo que se puede observar como levantamiento hidráulico. La presencia de fallas modifica el nivel piezométrico, por lo que se presentan domos piezométricos, como se observa en las fallas señaladas con las letras 1, a, b, A y posiblemente c (Figura 45).

En la unidad I se puede observar un cambio de color del lado izquierdo del perfil, esto por una cuestión de distinción de resistividades que se puede diferenciar del resto de la sección, por lo que posiblemente se pueda interpretar como un paleocanal; la unidad II se puede asociar con materiales limo-arcilloso y la unidad III con material limo-arenoso, cabe mencionar que la unidad IV parece estar parcialmente saturada.



**Figura 45.** Tomografía “Buena Vista”. Las líneas rojas representan la ubicación de la falla, la línea blanca punteada representa el nivel freático (N.F.), y los números de color blanco indican el número de capas.

## 6.4 Mapeo de fallas

Como resultado del uso del sistema de georreferencia Google Earth se obtuvo la imagen espacial dónde se identificaron las fallas de interés dentro del área de estudio (Figura 46), observando la distribución de estas estructuras, con separaciones que van desde los 5 m de distancia hasta los 1600 m entre cada falla, en un acomodo escalonado y con rumbo preferencial de N-S/NW-SE, teniendo en total 57 fallas, dónde se incluye las que fueron identificadas en años anteriores. La numeración presentada en el mapa sobre las líneas rojas representa las fallas en base a la tabla No. 6, para tener una mejor referencia de la distribución, ubicación y relación con los nombres que se presentan en dicha tabla.

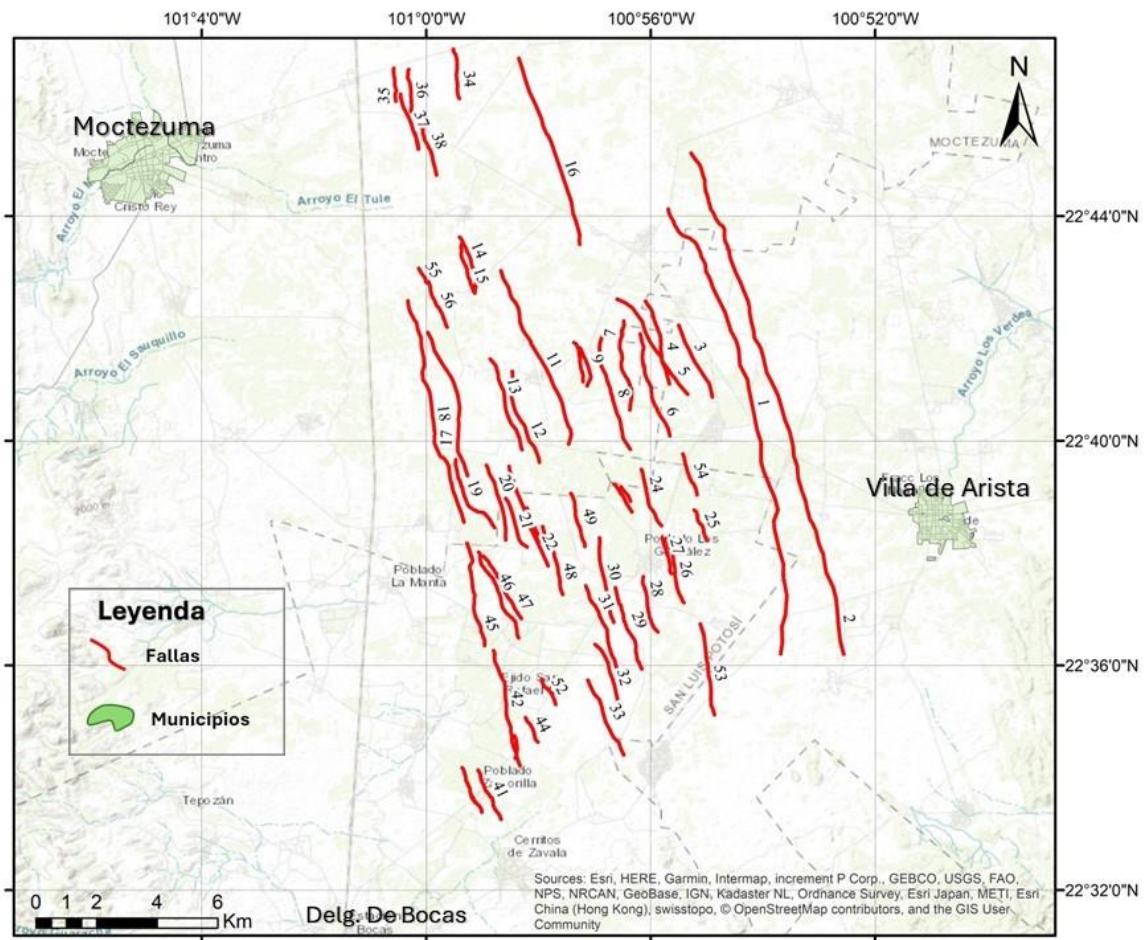


Figura 46. Mapa de fallas totales de la zona de estudio.

Como en un inicio de este trabajo se mencionó, llamaríamos a este conjunto de fallas “Área de Fallas y Agrietamientos de Bocas-Arista” (AFABA), ya que abarca un área determinada entre la Delegación de Bocas (al norte de la capital del estado) y a un costado del municipio de Villa de Arista.



## 6.5 Afectaciones a la infraestructura y riesgo para la población

Parte de los objetivos en el estudio de los fenómenos perturbadores geológicos como lo son las fallas, agrietamientos y fisuras, es conocer el potencial de riesgo que existe para la población, con el enfoque en las fallas del terreno que se originan o activan por ciertos factores, ya que estas estructuras provocan la rotura de la superficie y el subsuelo, lo que causa daños a viviendas establecidas e infraestructuras sobre dichas fallas, así como también la pérdida de suelos y tierras que tienen diferentes usos.

En este caso los daños fueron observados conforme se recorría el camino de Ahualulco-Corazón de Jesús (Figura 51), es decir, de la Delegación de Bocas, con dirección al municipio de Villa de Arista, y por la carretera Moctezuma – San Lorenzo (Figura 47) que conecta a Villa de Arista con el municipio de Moctezuma por la presencia de las fallas que se distinguían a simple vista, consecuencia del rompimiento y deformidad del pavimento en el camino, así como de la apertura en el suelo que había aledaño a las vías de interés.



**Figura 47.** Evidencia de la deformación del pavimento en la Carretera Moctezuma – San Lorenzo, de las fallas de Buena Vista 1 y 2.

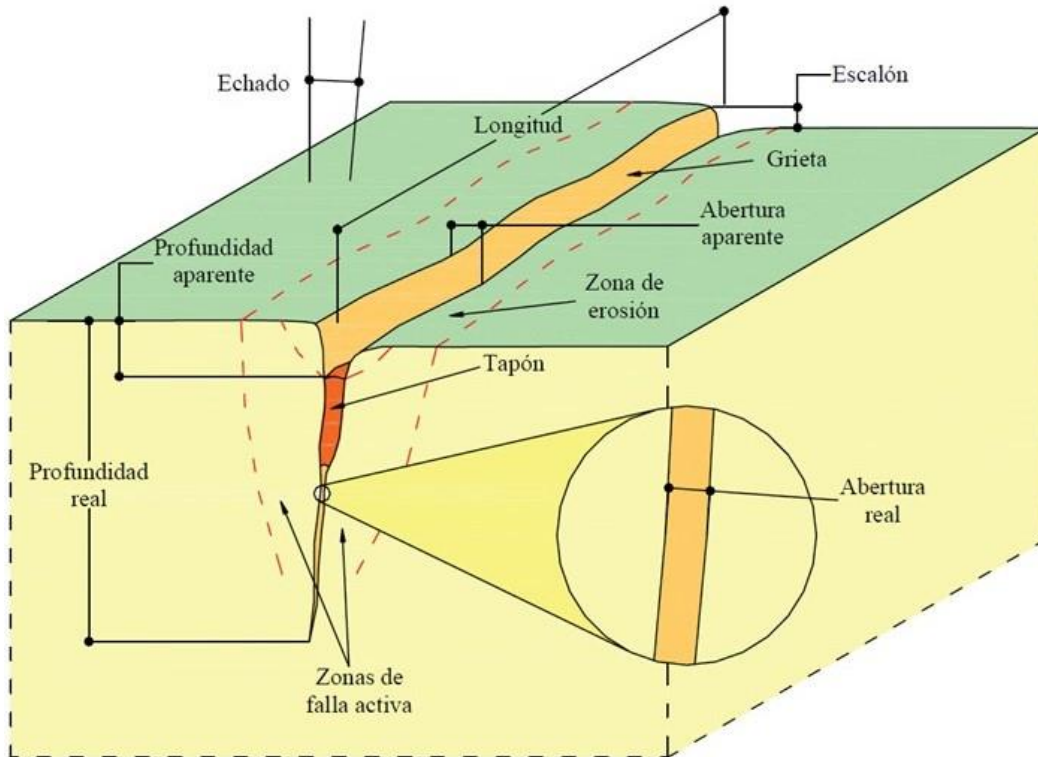


**Figura 48.** Evidencia fotográfica de la deformación del pavimento por la falla Buena Vista 1.

Una de las principales evidencias, fue que a simple vista se podía ver la deformación del suelo gracias al pavimento de la carretera, para interpretar la traza de la falla, así como el escalón o inclinación que se tiene en la falla (Figura 48).

Las fallas en este tipo de acomodo *escalón* o del tipo *falla normal* se relacionan con esfuerzos cortantes que suelen ser casi perpendiculares a la superficie, causando una grieta casi vertical y un desnivel entre ambos bloques; la inclinación o echado de la falla de los esfuerzos a los que esté sometido el macizo del suelo, tanto en su magnitud como dirección, así como se sus características mecánicas (Barragán y Rodríguez, 2021) (Figura 49).

En la última década ha incrementado la autoconstrucción, consecuencia de una planeación urbana inadecuada que ha causado dificultad en cuantificar el número de viviendas que se encuentran en riesgo y peligro por estar cercanas o expuestos a este tipo de fenómenos geológicos como lo son las fallas.



**Figura 49.** Esquema de las partes de una falla del terreno. Tomado de Barragán y Rodríguez (2021).

Del total de las fallas identificadas, se pudieron fotografiar desde el espacio aéreo y a nivel de piso alrededor de 5 fallas, obteniendo a mejor detalle el comportamiento de estas estructuras, para valorar el peligro que presenta y pudiera presentar en diferentes casos. Así como los daños ya creados en diferentes infraestructuras, y áreas de cultivo.

La complejidad del tema viene desde el hecho que se pueda provocar un desastre, por lo que ha sido necesario conocer las causas que preceden y siguen a estos fenómenos, empezando con el origen geológico:

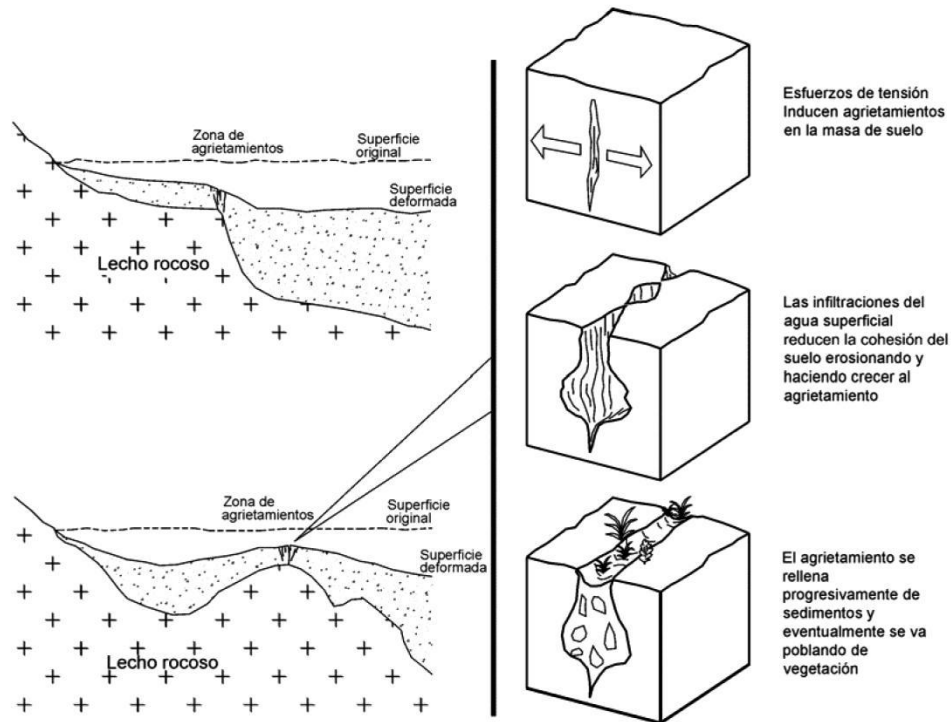
- Cambios en la sedimentología y estratigrafía de forma lateral y vertical en una secuencia sedimentaria (Marsal y Mazari, 1959).
- Control estructural, es decir, por la topografía del basamento (Auvianet y Arias, 1991).
- Reactivación de fallas geológicas preexistentes (tectónica) (Garduño *et al.*, 1997).

Así como por cuestiones antrópicas, en el Atlas de Riesgos del Estado de México mencionan los siguientes tres factores:

- La creciente población y la tendencia a una concentración en centros urbanos.
- La intervención del ser humano en el medio físico y ambiental, que aumenta las posibilidades de romper con el equilibrio natural.

Aparte existen factores que pertenecen a la hidrología y geohidrología del lugar, por ejemplo, Carpenter en 1999 explica que los agrietamientos se pueden generar casi de forma instantánea después de una lluvia torrencial (Figura 50), causando la debilidad de la superficie, filtrándose el agua a través de estas grietas, erosionándolas y haciendo que su tamaño aumente en un corto tiempo.

En la figura 51 se puede observar la apertura que tienen algunas de las fallas de la zona de interés, así como los daños al camino, a zonas de agricultura y a cerca de construcciones habitacionales, algunas de estas fotografías fueron donadas por parte de la Coordinación de Protección Civil Estatal de San Luis Potosí.



**Figura 50.** Representación de la generación de agrietamientos. Tomada y modificada de Carpenter (1999).

Tomando en cuenta estos factores podemos darnos una idea que las causas que podrían estar afectando la aparición de fallas, así como su comportamiento, tanto en el aumento de su extensión como en el ancho de ellas, provocando daños en el terreno, en la infraestructura, así como el peligro de algún accidente para los humanos que habiten cerca de ellas, como se puede observar en las figuras No. 52 a 54.

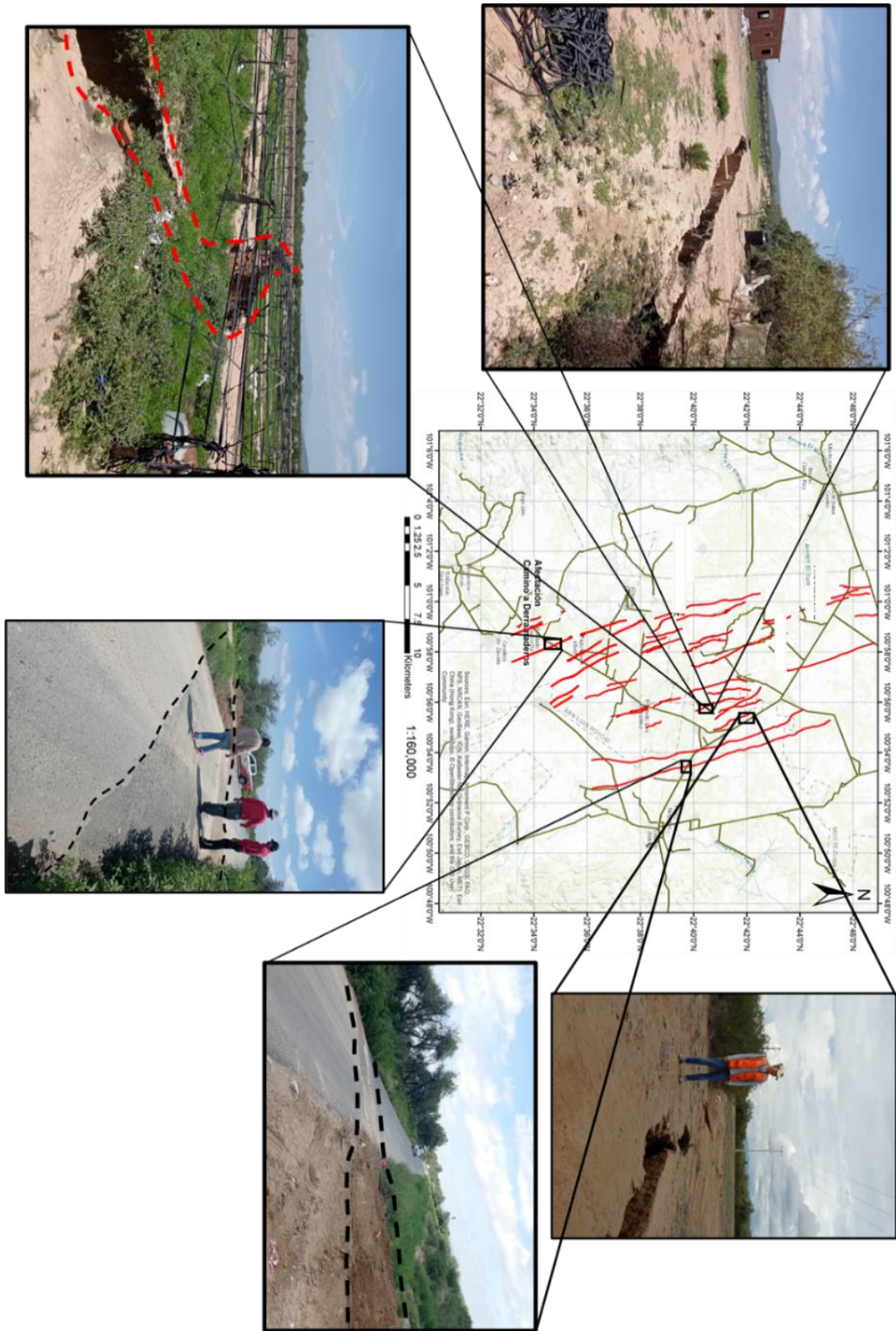
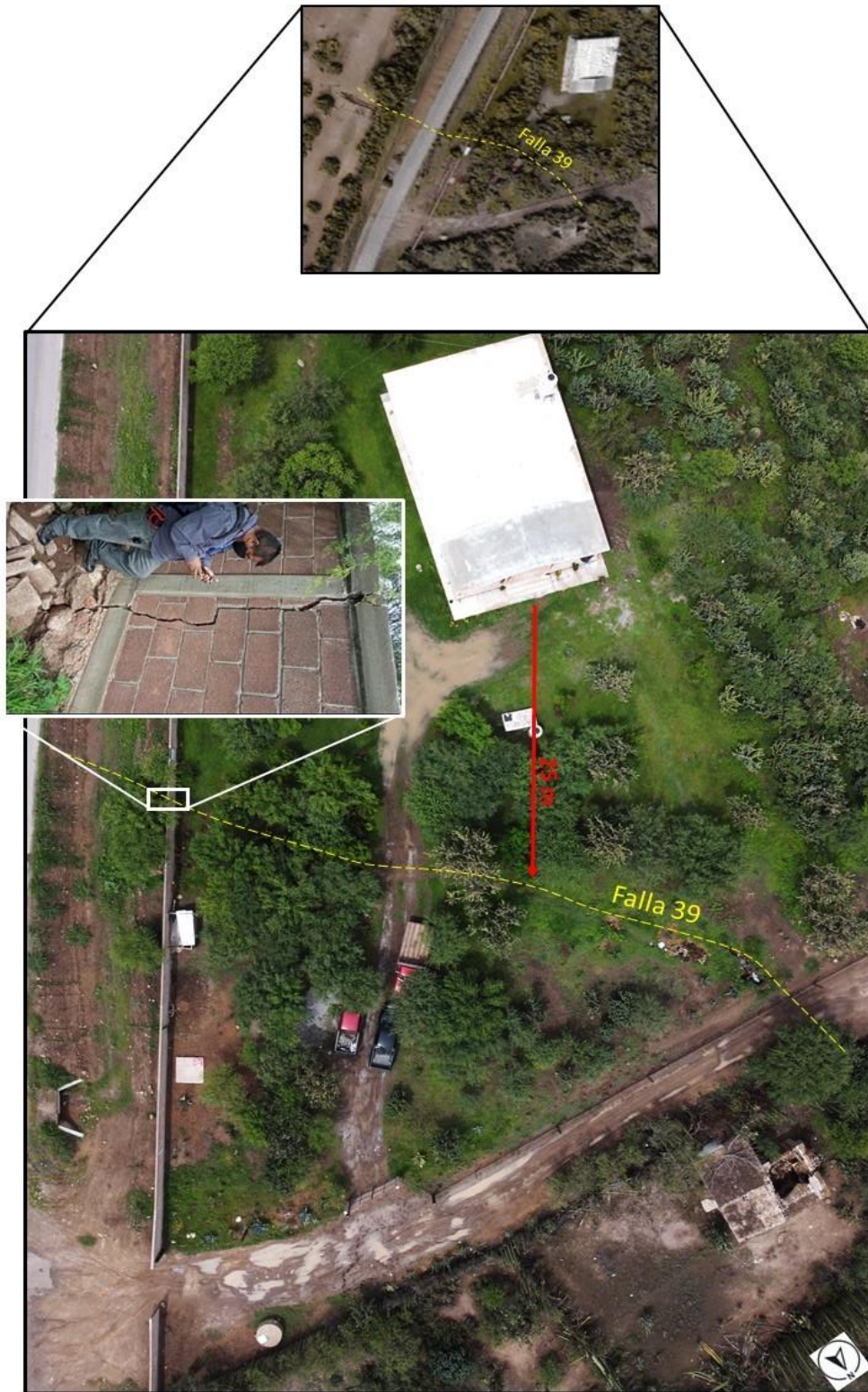


Figura 51. Daños por la aparición de fallas.



**Figura 52.** Toma de fotografía aérea en la identificación de la falla “Bocas 1”. La línea punteada de color amarillo es la falla y la flecha de color rojo indica la distancia entre la casa y la falla que se tiene de riesgo por la apertura de la misma.



**Figura 53.** Riesgo y daño por falla "Bocas 1".Afectación de circulación de vehículos.

Rojas *et al.*, (2002) menciona que la presencia de fallas en la superficie se debe a condiciones de una topografía irregular en el lecho rocoso, de aquí se deduce que tanto la ubicación a profundidad como la configuración geométrica del lecho rocoso son factores importantes en la evaluación de la magnitud de las deformaciones en la masa del suelo. Además de un basamento irregular, la aparición de fallas depende de más factores como puede ser el espesor del acuífero, el potencial de consolidación, la resistencia del material granular de la falla, etc.

Como parte importante de esta investigación fue realizar la medición de la apertura de algunas de las fallas, y se logró gracias los datos obtenidos a partir de las fotografías aéreas realizadas desde el dron, pudiendo observar a mayor detalle y desde una vista más amplia el cambio en el ancho de las fallas, así como la extensión de longitud en ellas y los colapsos de suelo que se detectaron. Una de las principales ventajas de la fotogrametría fue la aplicación de la fotointerpretación por la alta resolución con la que se obtuvieron las fotografías aéreas, destacando las características morfométricas de las fallas, y evidenciando la cercanía de fallas y viviendas, así como la utilidad que se le da a estas estructuras como basurero (Figuras 55 a 58).

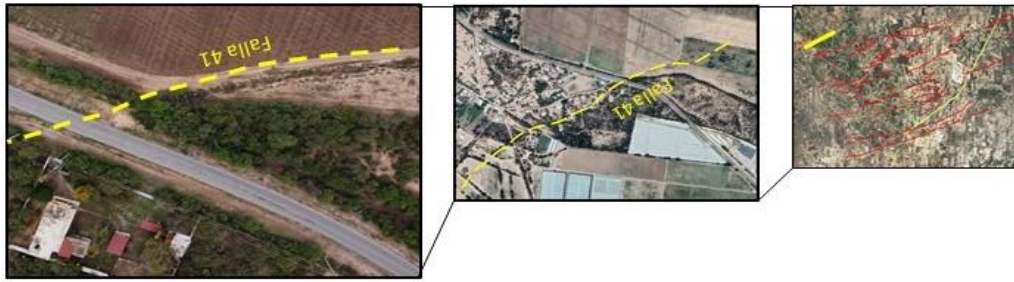
Para determinar el concepto de peligro que representaban estas fallas, se tenía que entender lo significaba *peligro*, y para ello la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (UNDRO) enuncia que el peligro es *la probabilidad de que ocurra un evento potencialmente desastroso durante un cierto tiempo en un sitio específico*.

Es decir, que un sujeto o sistema se puede encontrar en un peligro latente cuando se asocia a un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente.

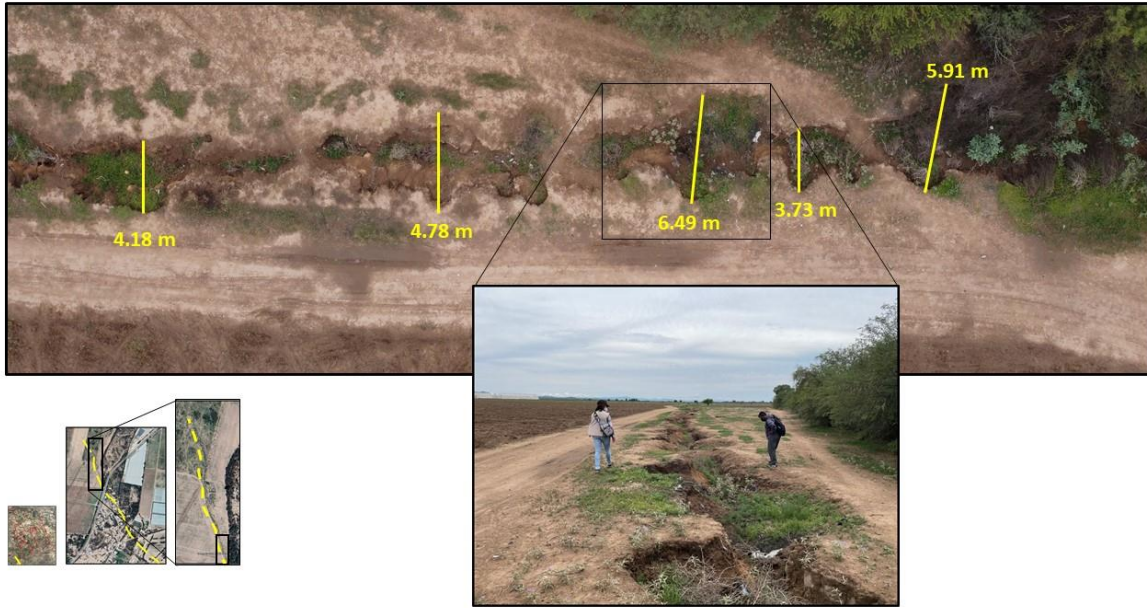
Este apartado es uno de los más importantes pues nos permite observar de mejor manera las fallas del terreno, para después contribuir a la población con el conocimiento de este fenómeno geológico, su comportamiento, así como un posible monitoreo de mejor calidad para ver sus procesos de cambio, nuevas fallas y hacer posibles correcciones en sus trazas dónde sea necesario.

Hernández y Láriz (2015) mencionan la necesidad que existe en la supervisión de viviendas con el objetivo de determinar los daños estructurales que se presenten en ellas, con la vital importancia de tener parámetros cualitativos y cuantitativos para determinar la tipología de una falla geológica, tomando en cuenta la geoposición de la falla con el existente urbanismo.





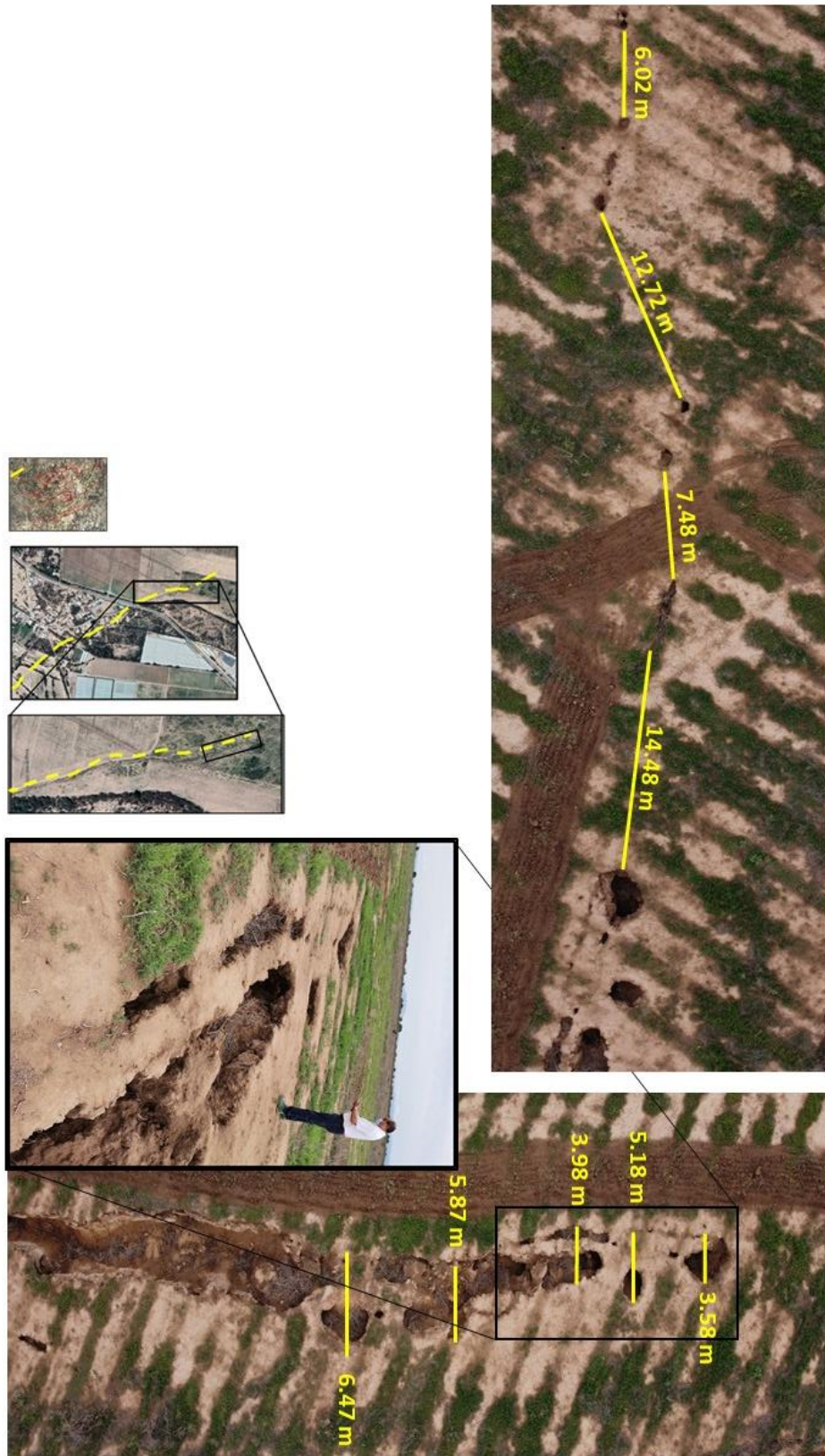
**Figura 54.** Fotografía aérea de la falla 41 (Bocas 3). Mide aproximadamente 2 km, atraviesa zonas de cultivo, así como la carretera y se encuentra a una distancia importante de una casa-habitación, lo que incrementa el riesgo por la existencia de esta falla.



**Figura 55.** Fotografía de falla No. 41 de nombre “Bocas 3”. Donde se tienen las diferentes medidas de apertura de la falla, gracias a un cálculo creado por Pix4Di para determinar la resolución, resultando que 1 pixel = 1.82 m.



**Figura 56.** Seguimiento a la misma falla No. 41, con cavidades más anchas y dispuestas en diferente forma.



**Figura 57.** Ultima parte de la falla "Bocas 3". Donde se observa la continuidad de la falla por medio de pequeños hoyos que se van separando a diferentes distancias.



**Figura 58.** Fotografías de la falla No. 42 de nombre “La Morita”. Encontrada con la mayor apertura de todas las fallas que se observaron, así como de un uso de relleno de basurero, aparte de estar a una distancia considerable de una casa habitación.

Como se puede observar en la figura 58 se ocupan estos espacios de falla como tiraderos clandestinos que se encuentran dispersos de la misma forma que las fallas, esta basura generada por la misma población del sitio generaría a la larga problemas de insalubridad, así como la proliferación de fauna nociva que se convertiría en transmisora de enfermedades.

Con base en las evidencias expuestas anteriormente y considerando el riesgo futuro por fallas del terreno y hundimiento se propuso una franja de seguridad. La franja de seguridad se construyó considerando un factor de seguridad de 1.5, de tal manera que el ancho máximo de protección se obtuvo de la siguiente manera:

$$AMS = FS * AMDO$$

Dónde:

AMS es el Ancho Máximo de Seguridad o Protección (en metros).

FS es el Factor de Seguridad, el cual es adimensional

AMD es el Ancho Máximo de Daño Observado y/o propuesto por Protección Civil.

Considerando la ecuación anterior se tiene que:

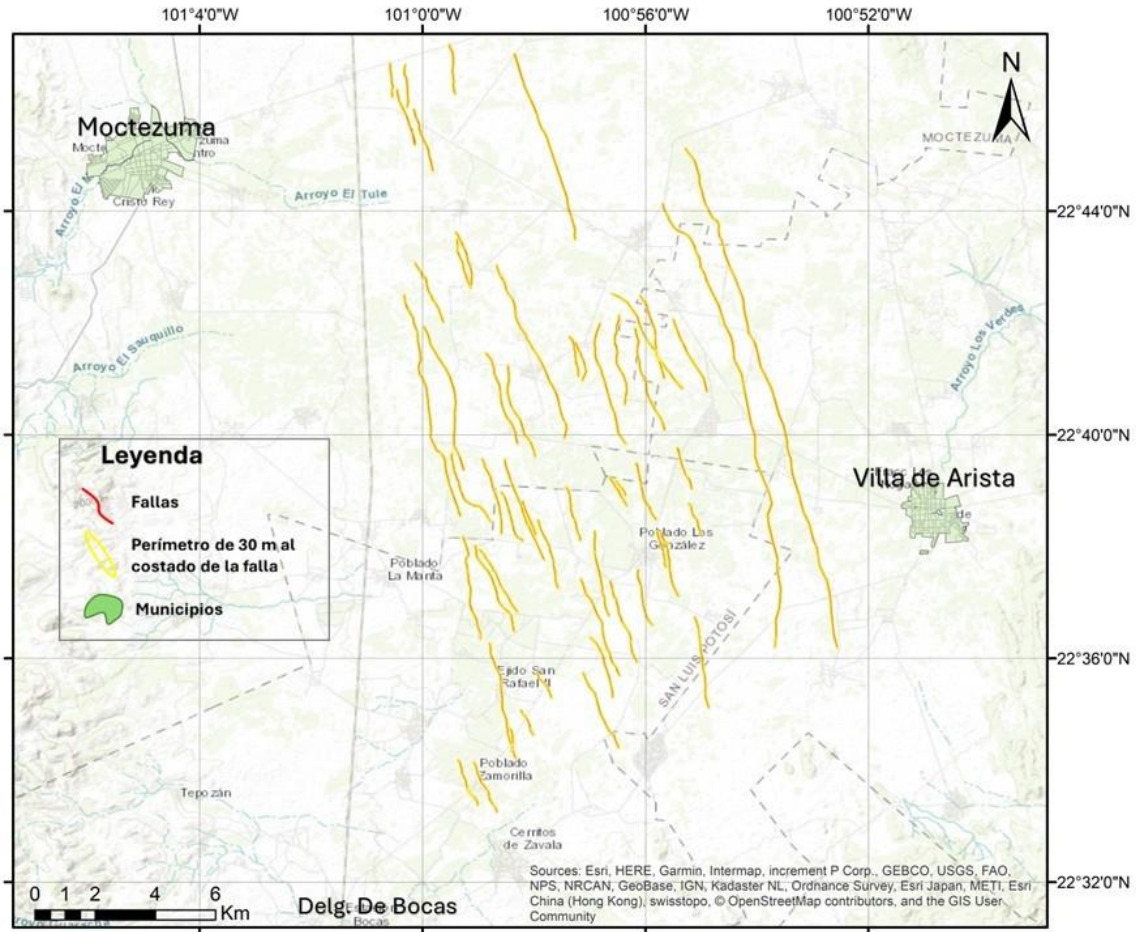
$$AMS = 1.5 * 20 m$$

$$\underline{AMS = 30 m}$$

Por lo que la franja de seguridad propuesta en este trabajo es de 30 m a cada lado de la traza de la falla del terreno.

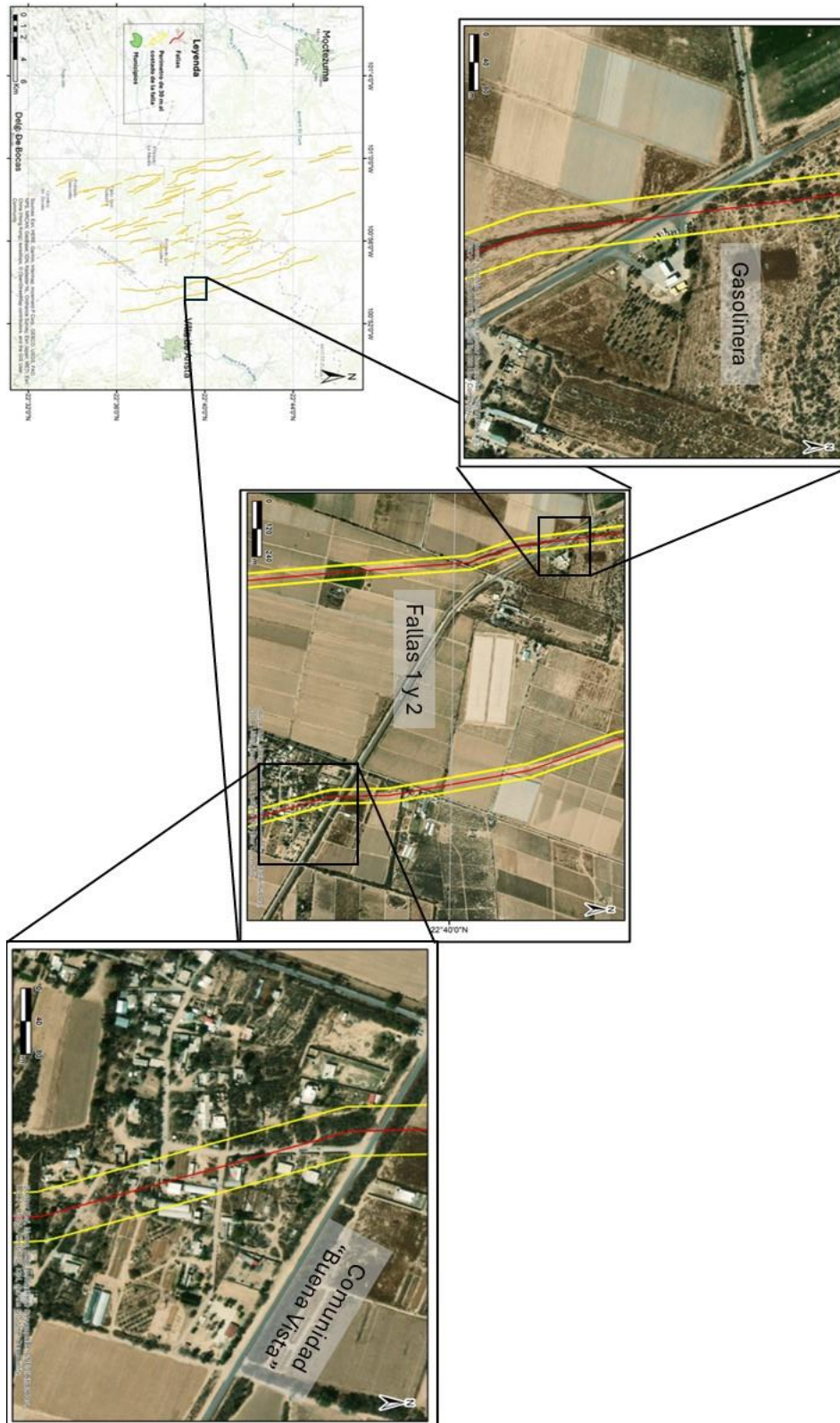
Con este resultado se procedió a realizar un tratamiento especial en el programa ArcGis a las fallas de la zona de estudio, llamado *bufer* (Figura 59), es decir, que este tratamiento realiza un perímetro alrededor de las fallas con la distancia considera de peligro y seguridad de 30 m. Esto con el fin de demostrar, que a esta distancia considerada se encuentran construcciones que pueden llegar a tener daños en caso de un crecimiento en el ancho y largo de la falla.

El hecho de tomar en cuenta un factor de seguridad no garantiza la inmunidad de daños al urbanismo instaurado particularmente en esta zona por la existencia de las fallas, por ello, es de gran importancia observar y conocer la mayoría de las características del territorio y poder establecer zonas geográficamente seguras para el establecimiento de la población.



**Figura 59.** Mapa con distancia considerada de peligro. A 30 m de cada lado de la falla.

Dada la escala del mapa y el objetivo de considerar esta distancia como factor de seguridad se realizaron algunos acercamientos a diferentes fallas desde Google Earth para poder observar varios ejemplos sobre el peligro que se tiene en diferentes construcciones y para la misma población (Figuras 60 a 64).

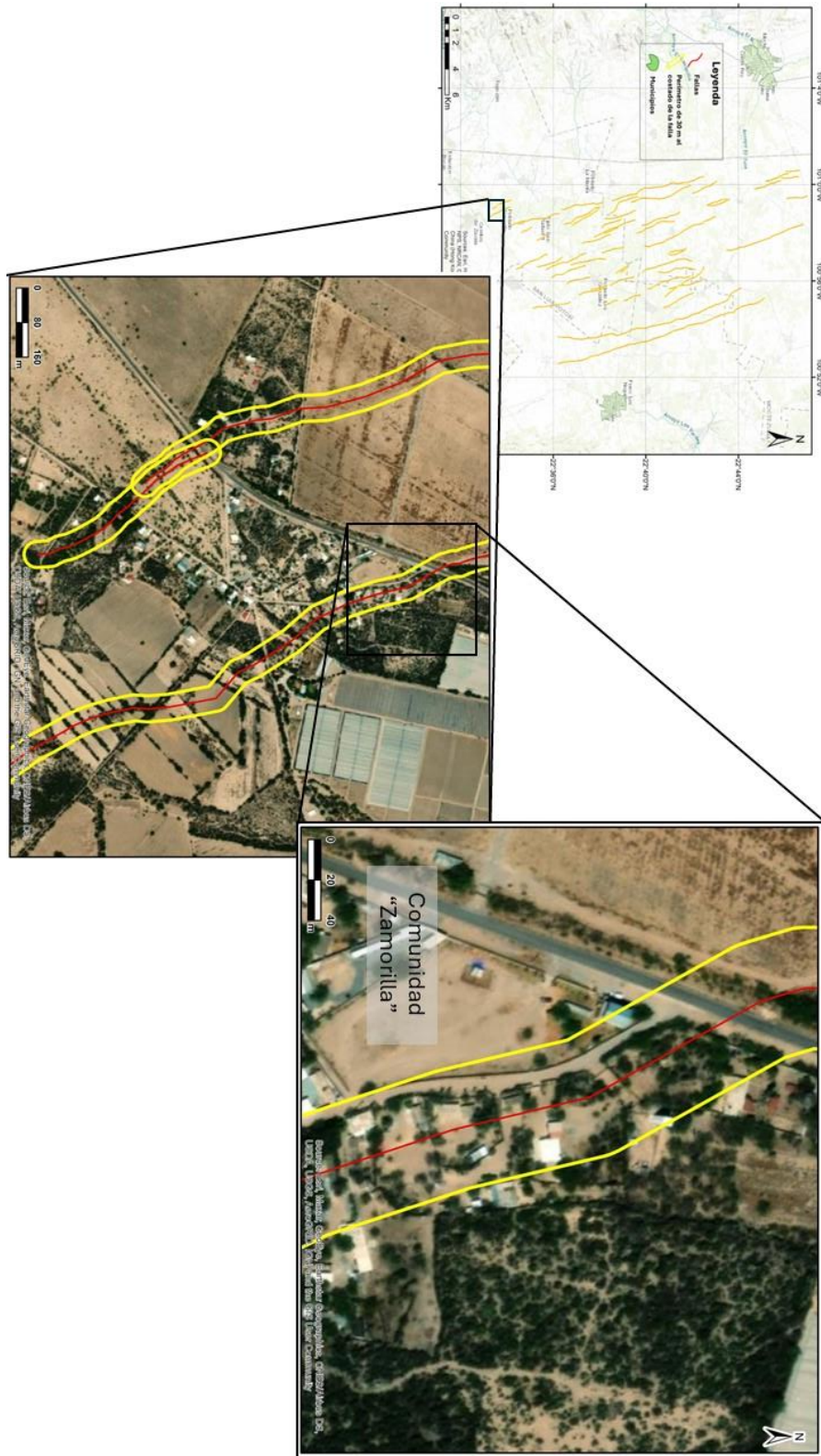


**Figura 60.** Acercamiento a las fallas con el perímetro de seguridad de 30 m. En las fallas No. 1 y 2 de la comunidad de “Buena Vista”, dónde se observa el peligro de diferentes construcciones por la apertura de la falla.



**Figura 61.** Ejemplo de las fallas No. 26 y 27 (Tabla 6) y perímetro de 30 m considerado como zona de peligro. En la comunidad de González, dónde se puede observar cómo podría afectar a un invernadero, así como a diferentes construcciones.





**Figura 62.** Acercamiento a las fallas 39, 40 y 41 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de 30 m de peligro. Particularmente, en la Falla 41 de la comunidad “Zamorilla”, dónde se observa que las casas se encuentran sobre la falla, así como terreno donde se encuentran.



**Figura 63.** Acercamiento a las fallas 12 y 13 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de peligro de 30 m. Particularmente, en la Falla 13 de la comunidad “Salsipuedes”, donde se observa que algunas casas se encuentran sobre la falla, así como dentro del perímetro.



**Figura 64.** Acercamiento a la falla No. 42 (Tabla 6) para poder observar el perímetro de peligro de 30 m. Dentro de la comunidad de “San Rafael Número Dos” dónde se observa que algunas casas se encuentran sobre la falla, así como dentro del perímetro.

Estos resultados son de gran importancia en el entendimiento del peligro que surge a partir de la existencia de fallas en el terreno (Figuras 60 a 64), en una zona o región; no existe un tiempo determinado para conocer si habrá una apertura más grande en la falla, causando probablemente diferentes daños, por ejemplo:

- Desniveles en el suelo, inclinaciones y daños en la infraestructura.
- Agrietamientos y colapsos en calles, carreteras, etc., haciendo nula su utilización, así como en canales y colectores de drenaje.
- Daños en tuberías de agua, alcantarillado o ductos subterráneos.
- Contaminación del acuífero por filtración de agua superficial que se combina con basura dentro de las fallas.

La evolución de las fallas es la principal causa de los diferentes daños que se pueden propagar, ya que una vez que la falla presenta una abertura (de cualquier medida) se inicia un proceso de erosión, provocado por factores naturales o antropogénicos; conforme la abertura crece en superficie se podrían generar zonas de falla activa. Por lo general las fallas permanecen abiertas durante la temporada de lluvias, estas se llenan de agua y por ende la carga hidráulica presiona en todas direcciones, provocando un aumento en el ancho y profundidad de la falla. Todas las fallas se encuentran en una cobertura de relleno aluvial, por lo que en temporada de estiaje la masa del suelo llega a ser drenada y abate temporalmente el nivel freático, produciendo asentamientos en la zona.

## CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los diferentes procesos y métodos aplicados en este trabajo son sujetos de mejora, sin embargo, se presenta una metodología novedosa para el estudio de las fallas del terreno, la cual debe tomarse a consideración en las futuras líneas de investigación.

En los últimos años se ha suscitado un incremento en los reportes por daños a construcciones e infraestructuras, a causa de la aparición de fallas en el terreno, por lo que la investigación de estos efectos ha aumentado en importancia, debido a las pérdidas económicas y materiales que se han tenido.

El desarrollo de mapas e inventario de fallas es necesario para el conocimiento de los diferentes orígenes, tipos y efectos dañinos en la población y en la economía, siendo importante su estandarización en lo que respecta a este fenómeno, ya que las diferentes dependencias encargadas en cuestión de la gestión de riesgo y peligro tienen sus bases de datos, sin embargo, muchas veces estos datos no concuerdan con sus similares o con nuevos estudios, y la información suele ser deficiente y de baja calidad.

Todo lo llevado a cabo en este trabajo fue empleado para la identificación y reconocimiento de las fallas, por lo que la investigación se concentró en identificar los diferentes casos y afectaciones en la zona de interés.

- Este trabajo destaca por presentar un análisis en Google Earth, ya que se implementó para llevar a cabo un monitoreo histórico en el área de estudio por la aparición de las fallas del terreno. Este análisis contribuye para actualizar el inventario de fallas del terreno del país, aunque dicho inventario no sea oficial. En este sentido, se sugiere que los nuevos estudios se enfoquen en crear una base de datos continua, estructurada y confiable de la ubicación, extensión, profundidad y afectación de fallas del terreno.

Haciendo un análisis regional estructural del resultado del mapa que se obtuvo (figura 46) en base a diferentes autores, se puede describir la distribución de las fallas en un arreglo de “*echelon*”, este arreglo es asociado a movimientos tectónicos y neotectónicos, que resultan de una ruptura por esfuerzos tectónicos de cizalla (trastensión y transpresión).

- En el caso de la aplicación de la geofísica por el método de tomografía eléctrica, beneficio el estudio de este trabajo para comprender con mayor detalle el comportamiento de las fallas, sobre todo en el subsuelo, en relación con el material geológico, así como del agua que pudiera haber en el terreno; los resultados con esta técnica de medición ayudaron a relacionar la descripción de otros autores con lo encontrado en campo y coincidir con la geología del área, siendo un relleno aluvial, así como la

identificación de paleocauces, y de algunas posibles fallas que aún no emergen en la superficie, también se pudo determinar en base a la sección el posible nivel freático.

Sin embargo, por ciertas limitaciones hicieron falta más de estas tomografías, para conocer con mayor detalle el comportamiento del agua en esta zona y ver su relación entre cada falla. Aparte de ello la falta de información actualizada de extracción de agua subterránea o de los niveles piezométricos perjudicaron un mayor entendimiento para este caso, ya que la información no era de años recientes.

- En cuanto a la fotogrametría, cumplió satisfactoriamente el objetivo, ya que se pudieron observar a mayor detalle las trazas de las fallas, así como su cercanía con las construcciones. Este método también permitió determinar de mejor manera las características morfométricas a partir de una alta resolución de las fotografías aéreas, así como la obtención de un modelo en 3D. No obstante, este procedimiento está sujeto a mejoras, ya que se puede ampliar el rango de filtrado con una mayor cantidad de tomas aéreas, tener una mejor estrategia de vuelo para la selección de fallas; así como la implementación de nuevas técnicas como lo es el LiDar.

Lo anterior, abre pauta para mejorar en la actualización de información sobre este fenómeno, dando un mejor conocimiento de estas estructuras, pudiendo exhibir a la población imágenes a mayor detalle (mejor resolución) en diferentes plataformas, muy especialmente en los Atlas de Riesgos, desde los municipales hasta el nacional.

En conclusión, para este trabajo se pueden enunciar los siguientes puntos:

- En el presente trabajo se identificaron y documentaron 57 fallas, mediante trabajo de campo, así como la aplicación de geofísica y fotogrametría. Anteriormente, en el 2013 se tenían identificadas siete de estas fallas, así como 10 de ellas en el 2017.
- Las fallas de la zona de estudio pertenecen a lo que algunos autores llaman el Graben de Villa de Arista, sin embargo, no se descarta la existencia de más fallas en esta zona; así como de su arreglo tipo *echelon*, cuyo origen se relaciona con movimientos laterales, teniendo un comportamiento transtensional como transpresional, con una orientación NW-SE.
- De acuerdo con los resultados de las tomografías eléctricas, las fallas profundizan más allá del nivel freático del acuífero, y con ello se puede interpretar que podrían tener un origen tectónico; además de que llegan a tener una función de recarga; por lo que también representa un riesgo por el reacomodo de material que se puede tener en el subsuelo, ya que el

agua erosiona las paredes de sedimentos semi-consolidados o no consolidados, favoreciendo los colapsos de material.

- Por su relación geológica-hidrológica la presencia de las fallas y fracturas en el Valle de Villa de Arista representa un riesgo de contaminación del acuífero, debido a la acumulación de basura que se produce en las aperturas de las fallas, lo que causa infiltración de contaminantes químicos de tipo agrícola (agroquímicos) y urbanos (aguas residuales).
- Las fallas tienen una mayor amplitud y densidad en la zona centro-sur, y hacia la parte norte tienden a desaparecer, haciéndose relativamente angostas, esto fue identificado con ayuda de Google Earth, así como de la obtención de morfometría de fallas por la aplicación de la fotogrametría.
- Con todas estas herramientas se realizó y se presenta un mapa de fallas existentes en la zona de interés, así como una tabla con sus respectivas características morfométricas. La caracterización de algunas de las fallas con trabajo campo y con ayuda de las fotografías aéreas; permitieron proponer un mapa de peligro que considera una franja de seguridad. Dicha franja de protección tiene un ancho total de 60 m, 30 m a cada lado de la traza de la falla. Esta zona de seguridad tiene como objetivo de evitar la construcción civil como medida preventiva ante daños estructurales o de otra índole en el futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Advanced Geosciences (2023).** SuperSting Wi-Fi. Imágenes Eléctricas Rápido y Fácil. <https://www.agiusa.com/node/159>
- Agencia Federal de Aviación Civil (2020).** Registro Aeronáutico Mexicano (04 de septiembre de 2020). *Instructivo para obtener un registro de RPAS emitido por el Registro Aeronáutico Mexicano, Dependiente de la Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC)*. <https://www.gob.mx/afac/acciones-y-programas/rpas-drones>
- AGI, (s.f.).** SuperSting Wi-Fi. Imágenes Eléctricas Rápido y Fácil. <https://www.agiusa.com/node/159>
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Ojeda-García, A.C., Orozco-Esquivel, M.T., Vasallo, L.F., (2001).** Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 129-148.
- Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A.F. (2002).** El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVI, p. 65-82.
- Almaguer-Ramírez R.E., (2014).** Análisis estructural del sistema de fallas normales en el complejo volcánico de Aqualulco, S.L.P. [Trabajo Recepcional, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí].
- Arzate F., J., Barboza G., R., López D., R., Pacheco M., J., Mata S., J., Antonio del Rosal, Peña-Díaz, I., Olivares C., (2006).** Estudio Geológico-Geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos en el área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. INFORME FINAL.
- Auvinet, G. y Arias, A., (1991).** Propagación de grietas. En "Arietamiento de Suelos". Ed. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 21- 31.
- Auvinet G. (2010).** Soil fracturing induced by land subsidence. En *Land subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. IAHS Publication 339, pp 20-26.
- Auvinet G., Méndez E. & Juárez M. (2013a).** Soil fracturing induced by land subsidence in Mexico City. En *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*,



International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, Francia.

**Auvinet G., Méndez E. & Juárez M. (2013b).** Evaluation of regional subsidence and soil fracturing in Mexico City Valley. En Proceedings of the Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina.

**Auvinet G., Méndez E. & Juárez M. (2017).** El subsuelo de la ciudad de México (The Subsoil of Mexico City). Vol. III, Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Auvinet G. & Reséndiz D. (2018).** Confusiones surgidas a partir de los sismos de 2017 en la Ciudad de México. Geotecnia, Órgano oficial de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C., 246, 24-27.

**Barboza-Gudiño J.R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., Martínez-Macías, P.R., (2004).** Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 21. Págs. 299-319.

**Barboza-Gudiño, R., López-Doncel, R., Mata-Segura, J.L., Borseli, L., Saucedo-Girón, R., Aceves de Alba, J., Ramírez-Guerrero, D., (2018).** Actualización del Atlas de Riesgo para el Municipio de San Luis Potosí y su zona conurbada. H. Ayuntamiento de San Luis Potosí. Sistema Nacional de Protección Civil de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Instituto de Geología.

**Barragán R. E., y Rodríguez J. M., (2021).** Génesis y mitigación del agrietamiento en el subsuelo en el suroriente del Valle de México. XXX Reunión Nacional de Ingeniería en Geotecnia. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C.

**Barros Bravo A. D., (2008).** Geoinformación de la ciudad de Cuenca, Aplicaciones sobre Google Earth y Google Maps [Tesis de Licenciatura]. Universidad del Azuay. Facultad de Ciencias de la Administración.

**Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1980).** Glossary of Geology. 2nd Edition, American Geological Institute, Virginia.

**Bogoslovsky, V., & Ogilvy, A. (1977).** Geophysical methods for the investigation of landslides.-Geophysics.

**Carpenter M. C., (1999);** Land subsidence in the United State: Circular 1182, U. S. Geological Survey. Galloway D., Jones D. R. e Ingebritsen S. E. eds. Part I, Mining Ground Water, South-Central Arizona. p. 65-81.

- CENAPRED (2018).** Atlas de Riesgos del Estado de México.
- Clavo L.D. (1982).** Apuntes de fotogrametría. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, Universidad Politécnica de Madrid, España. Pp. 259.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2020).** Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero San Luis Potosí (2411), Estado de San Luis Potosí.
- Davis, G.H. and Reynolds, S. (1996).** Structural Geology of Rocks and Regions. Wiley.
- Diario Oficial de la Federación, (2015).** ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero de Villa de Arista, clave 2408, en el Estado de San Luis Potosí, Región Hidrológico-Administrativa Cuencas Centrales del norte. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Díaz-Sotomayor, M.G., (2019).** Aplicación de fotogrametría y termografía aérea como herramientas para la gestión de un tramo de río. Tesis para grado de Maestría. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Programa de Magister en Ingeniería Agrícola.
- DJI, (2023).** Support for DJI Mini 2. <https://www.dji.com/mx/support/product/mini-2>
- EcuRed, (2022).** Google Earth. [https://www.ecured.cu/Google\\_Earth](https://www.ecured.cu/Google_Earth)
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García M., y Marrett R., (2000).** Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. Boletín De La Sociedad Geologica Mexicana V. 53, p. 1-26.
- Fernández, M. B., Monterrubio P. S., Nespereira J. J., Santos, D. G., (2013).** *Google Earth en la enseñanza de la Geología* [Diapositivas de PowerPoint]. Proyecto de Innovación Docente. Universidad de Salamanca. <https://gredos.usal.es/handle/10366/125179>
- Figuerola Vega, G. (1989).** Recomendaciones para el manejo del problema de grietas por explotación del agua subterránea, Alternativas Tecnológicas 29, Academia Mexicana de Ingeniería, pp. 373-378
- Figuerola. J.C., (1974).** Tratado de Geofísica Aplicada. Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas. Edición 3.
- Fossen H. (2010).** Structural Geology. Cambridge University Press. pp. 457.

- Garduño, V.H., Israde, I., Francalanci, L., Carranza, O., Chiesa, S., Corona, P., y Arreygue, E., (1997).** Sedimentology, volcanism and tectonics of the southern margin of the lacustrine basins of Maravatío and Cuitzeo, Mich., Mexico, in IAVCEI General Assembly, Fieldtrip guidebook, Puerto Vallarta, Jal., Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Unidad Editorial, 15 p.
- Griem, W., (2009).** *Apuntes geología estructural.* K&W GEOLOG. <https://www.geovirtual2.cl/Geoestructural/gestr04a.htm>
- Hernández, M. M., Láriz, M. M., (2015).** Actividad de una falla geológica superficial y registro de sus daños en edificaciones en Pabellón de Hidalgo, Aguascalientes. Investigación y Ciencia. Vol. 23, no. 66, pp.22-27. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67446014004>
- H. Ayuntamiento de San Luis Potosí, (2007).** Modificación Específica del Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio Libre de San Luis Potosí, en la Sección Sur Oriente de la Intersección Formada por la Carretera a Rioverde y el Libramiento Oriente de Cuota (PMDU).
- Imlay, R.W. (1936).** Geology of the western part of the Sierra de Parras.- Bol. Geol. Soc. Am., v.47, p. 1091-1152.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), (2002).** Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí, disponible en [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240\\_4.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240_4.pdf)
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., (1982).** Revisión Estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 85, 208 p.
- Ledezma-Guerrero, O., (1967).** Resumen de la Geología de la Hoja Parras, 13R-1(6) escala 1:100000, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México Serie de 1: 100 000, 1 mapa con texto.
- Manilla-Aceves, A.A., (2003).** GEOFÍSICA APLICADA EN LOS PROYECTOS BÁSICOS DE INGENIERIA CIVIL. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 229. Sanfandila, Qro.

- Marsal R. J., Mazari M., (1959).** El subsuelo de la Ciudad de México. Vol. II, The subsoil of the Mexico City. Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Martínez-Ruíz, V.J., (1983).** Presente y Futuro de las Cuencas Geohidrológicas de Villa de Reyes, San Luis Potosí y Villa de Arista, S.L.P. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico No. 85, 208 p.
- Mata-Segura, J.L., (2017).** Actualización de las Grietas del Terreno en la Delegación de Bocas, Municipio de S.L.P. Instituto de Geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaníz-Álvarez, S. A., Camprubí í Cano, A., (2005).** La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, p. 285-318.
- Oliver-Ocaño, F. M., Laborín-Moreno, J. A., Becuar-Peña, F. J., García-López, C.F., (2019).** *APLICACIÓN DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS DE CARBÓN. EPISTEMUS.* Universidad de Sonora.
- Ortega, D. (2015).** Piloto de Dron (RPAS). Madrid, España: Paraninfo.
- Palacky, G.J. (1988).** Resistivity characteristics of geologic targets. Investigations in Geophysics: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Vol.1, 3.
- Pérez-Álvarez, J.A., (2001).** Apuntes de Fotogrametría III. Ingeniería Técnica en Topografía. Centro Universitario de Mérida. Universidad de Extremadura. Mérida.
- Poland, J.F. and Davis, G.H. (1969).** Land Subsidence Due to Withdrawal of Fluids. *Reviews in Engineering Geology*, 2, 187-269. <http://dx.doi.org/10.1130/REG2-p187>
- Plan Estratégico para el Desarrollo del Sector Civil de los Drones de España (2018-2021).** Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Quirós E. (2014).** Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicada a la ingeniería civil. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones, Cáceres, España. P. 139. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10662/3142>
- REPDA (2022).** Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Retrieved from <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

- Rodríguez, D.F., (2015).** *ESTUDIO DE TÉCNICAS ELÉCTROMAGNÉTICAS DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO.* Ingeniería Técnica en Topografía. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Rogers, C.L., De Cserma, Z., Tavera-Amezcu, E., Ulloa, S., (1957).** Geología general y depósitos de fosfatos del Distrito de Concepción del Oro, Estado de Zacatecas: Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, Boletín 38, 129 p.
- Rojas, E., Arzate, J. y Arroyo, M., (2002).** A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. *Engineering geology*, No. 65, p. 245-260.
- Rzedowski, J., (1966).** Vegetación del estado de San Luis Potosí. Tesis Doctoral, UNAM, Mexico City.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2019).** NOM-107-SCT3-2019: Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (Rpas) en el espacio aéreo mexicano. Estados Unidos Mexicanos.
- Servicio Geológico Mexicano (2003).** Carta Geológico-Minera [Arista F14-A64] [San Luis Potosí]. 1:50,000. Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano (2004).** Carta Geológico-Minera [Moctezuma F14-A63] [San Luis Potosí]. 1:50,000. Secretaría de Economía.
- Shunshan Xu, Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., (2021).** Inherited structures controlling the development of the Arista-Ahualulco graben in the Mesa Central, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 112. Centro de Geociencias, Universidad Autónoma de México, Blvd. Juriquilla, Qro.
- Tristán-González, M., (1986).** Estratigrafía y tectónica del Graben de Villa de Reyes, En los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 107, 91 p.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, Barboza-Gudiño, J. R., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R., (2008).** Geocronología y distribución espacial de los centros eruptivos del Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 60, No. 1.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J. R., Torres-Hernández, J. R., López-Doncel, R., Labarthe-Hernández, G., 2009<sup>a</sup>.** Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo

Volcánic de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, p. 287-303.

**Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014).** Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>

**Villalpando Tovalín, F., (2016).** Modelado de deslizamiento de terrenos utilizando GPS y percepción remota: Caso Ahualulco, S.L.P. Tesis de Maestría. IPICYT.