

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**IDENTIFICACION DE ZONA DE INFLUENCIA DE DISCONTINUIDADES ASOCIADAS A
SUBSIDENCIA Y CORRELACIÓN CON LOS DAÑOS A ESTRUCTURAS SUPERFICIALES**

PRESENTA

Ing. Carlos Esquinca Ortiz.

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON ESPECIALIDAD
EN CONSTRUCCIÓN.**

TUTOR

Dr. Martin Hernández Marín

COTUTOR

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Hugo Luna Villavicencio

M.I. Adrián Efraín Prieto Ángel

Aguascalientes, Ags, 25 de octubre del 2023

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

Autorizaciones

Mtra. Ma. Guadalupe Lira Peralta
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutoral** designado del estudiante **CARLOS ESQUINCA ORTIZ** con ID 339389 quien realizó la tesis titulado: **IDENTIFICACION DE ZONA DE INFLUENCIA DE DISCONTINUIDADES ASOCIADAS A SUBSIDIENCIA Y CORRELACIÓN CON LOS DAÑOS A ESTRUCTURAS SUPERFICIALES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 23 de octubre de 2023.



Dr. Martín Hernández Marín

Tutor de tesis



Dr. Jesús Pacheco Martínez

Co-Tutor de tesis



Dr. Hugo Luna Villavicencio

Asesor de tesis



M.I. Adrián Efraín Prieto Ángel

Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código / DOKSEE PQ-36
Autorización: 00
Fecha: 17/05/15



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 23/10/2023

NOMBRE: Carlos Esquina Ortiz ID: 339389

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería civil LGAC (del posgrado): Estructuras y Construcción

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico
 IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE INFLUENCIA DE DISCONTINUIDADES ASOCIADAS A SUBSIDIENCIA Y CORRELACIÓN CON LOS DAÑOS A ESTRUCTURAS SUPERFICIALES

TÍTULO:
 IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Se propone una dimensión de zona de afectación del suelo debido a discontinuidades superficiales, basado en un análisis geofísico y constructivo. El impacto social tienen que ver con la vivienda estructuralmente más segura.

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación ó a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica ó profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutoral, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cursos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
NO				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
En caso de Tesis por artículos científicos publicados				
N.A.				Aceptación o publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado. Si No

Elaboró:
 * NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN: Dr. Manuel Ángel Soto Zamora
 NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO: Dr. Matías Hernández Marín
 * En caso de conflicto de intereses, firmará un revtor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutoral, expreso por el Decano
 Revisó:
 NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO: Dr. Mario Ernesto Esparza Ríos de León
 Autorizó:
 NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO: Mtro. M^o Guadalupe Lira Paralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado
 En concordancia con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala sobre las funciones del Consejo Académico: ... Calificar la efectividad (servicio) de programa de posgrado y el Art. 105B del Reglamento del Secretario Técnico, frente al seguimiento de los alumnos.
 Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
 Revisado por: D. Control Escolar/D. Control de Calidad.
 Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.
 Código: 00-SEE-F015
 Actualización: 01
 Emisión: 28/04/20

Agradecimientos

A Dios, por otorgarme los medios para estudiar y ayudarme en los momentos más difíciles proporcionándome fortalezas para lograr todo lo que me he propuesto.

A mis padres, que son los pilares más grandes de mi vida quienes me han inculcado valores y me han enseñado que el trabajo y la dedicación son herramientas indispensables para lograr todo lo que me proponga.

A mi hermano y mis hermanas, Amílcar, Liz y Florecita por alentarme en todo momento para que culminara de la mejor manera mis estudios de maestría, proporcionándome su apoyo incondicional.

A mi sobrina Adria, quien ha sido mi motor para seguir adelante brindándome felicidad, risas y cariño, siempre tendrás mi apoyo en todo momento

A mi cuñada Karlita, quien ha sido una persona que ha traído felicidad a mi familia haciéndose parte de ella.

A mi Tutor el Dr. Martín Hernández Marín y a la Mtra. Norma González Cervantes, por su tiempo, paciencia, enseñanzas, disposición y sus consejos los cuales fueron fundamentales para lograr mis objetivos y querer seguir trabajando en mis proyectos.

A mi Co-tutor el Dr. Jesús Pacheco Martínez, por su ayuda en la campaña experimental y su disposición para orientarme en mi trabajo de investigación.

A mis asesores, el Dr. Hugo Luna Villavicencio y el M.I. Adrián Efraín Prieto Ángel por los conocimientos proporcionados para encaminar mi trabajo de investigación.

A CONACYT por la beca otorgada pudiendo así continuar con mi preparación profesional.

A mis compañeros de la maestría por su amistad y compañerismo, en especial a Omar, Josué y Michelle por tantas risas y anécdotas haciendo que mi estancia en Aguascalientes fuera inolvidable.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por darme la oportunidad de formar parte de la Maestría en Ingeniería Civil y apoyar a la investigación.

Índice General

Resumen.....	7
1. Introducción.....	8
1.1. Planteamiento del Problema de Investigación	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo General	10
1.2.2. Objetivos Particulares	10
1.3. Justificación.....	11
1.4. Hipótesis	11
2. Fundamentación Teórica.....	12
2.1. Definición de falla geológica.....	12
2.1.1. Características de una falla geológica	12
2.1.2. Tipos de falla geológica	13
2.2. Subsistencia.....	16
2.2.1. Causas que generan la subsidencia.....	17
2.2.2. Formación de fisuras inducida por bombeo en presencia de fallas preexistentes.....	21
2.3. Métodos Geofísicos	22
2.3.1. Métodos sísmicos.....	22
2.3.1.1. Método de refracción sísmica.....	24
3. Estado actual del conocimiento.....	29
3.1. Análisis del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Aguascalientes	29
3.2. Criterio de área de afectación aledaña a fallas y grietas	31
3.3. Estudios previos.....	34
3.3.1. Tomografía Eléctrica Resistiva.....	35
3.3.2. Zanja de inspección.....	37
3.3.3. Normatividad del ancho de influencia en Aguascalientes.....	37
4. Metodología.....	39
4.1. Etapa 1: Investigación bibliográfica	39
4.2. Mapeo de afectaciones en inmuebles dañados por la falla geológica.....	39
4.3. Etapa 3: Aplicación de sondeos sísmicos	40
4.4. Etapa 4: Análisis de la información.....	41
5. Resultados	43

5.1. Levantamiento topográfico	43
5.2. Sondeos Geofísicos de refracción sísmica	45
5.2.1. Zona Uno	45
5.2.2. Zona dos.....	49
5.2.3. Zona tres	54
5.3. Evaluación de daños en edificaciones	58
5.3.1. Velódromo	58
5.3.2. Análisis de bodegas examinadas	60
6. Discusión de resultados.....	68
7. Conclusión	73
Bibliografía	74
Anexos.....	78

Índice de tablas

Tabla 2.1 Velocidad promedio de ondas secundarias u ondas S, correspondiente para 30 m de profundidad (Schmidt, 2010).....	23
Tabla 2.2 Velocidades de onda P para diferentes materiales (Martínez-Pagan, 2014).23	
Tabla 5.1. Análisis de daños presentes en la bodega dos	61
Tabla 5.2. Análisis de daños presentes en la bodega cinco	63
Tabla 5.3. Análisis de daños presentes en la bodega ocho.....	65

Índice de figuras

Figura 2.1 Característica de una falla geológica..... 13

Figura 2.2 Tipos de fallas geológicas a) plano de una falla normal b) Plano de falla inversa c) Falla de desplazamiento de rumbo (Redibujado de (Rodríguez et al., 2019))..... 15

Figura 2.3. Efecto de subsidencia por abatimiento de mantos acuíferos (Redibujado de Tomás et al., (2009))..... 19

Figura 2.4 Mecanismo de falla (Redibujado de González y Carrizo, (2003)) 20

Figura 2.5. Modelos hipotéticos del mecanismo de fisuración a) Modelo de la viga de flexión b) Modelo de Timón c) Modelo de discontinuidad de desplazamiento horizontal (Redibujado de Hernández-Marín y Burbey, (2010))..... 21

Figura 2.6 Arreglo de geofonos y propagación de la onda sísmica artificial (Redibujado de (Burger et al., 2006))..... 25

Figura 2.7 Configuración de geófonos para el estudio de dos estratos con el método de refracción sísmica (Redibujado de (Luna-Villavicencio, 2018))..... 27

Figura 2.8 Grafico distancia vs tiempo (Vargas, 2019)..... 28

Figura 3.1. Avance de la subsidencia en el valle de Aguascalientes. A) Traza de grietas en el año 1985 (Aranda Gómez & Aranda Gómez, 1985) b) traza de grietas en el año 2002 (Arroyo Contreras & Zermeño de León, 2004) c) traza de grietas actualizada por parte del SIFAGG..... 30

Figura 3.2 Análisis de la falla oriente ubicada en las instalaciones del IDEA. a) Pendientes y niveles falla oriente (Redibujado de Trejo-Corona, (2021))..... 32

Figura 3.3 Propuesta de restricción. Redibujado de Trejo-Corona, (2021)..... 32

Figura 3.4 determinación de la susceptibilidad al fracturamiento y la zona activa de la falla (Luna-Villavicencio, 2018). 34

Figura 3.5. Zona de estudio – Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes. . 35

Figura 3.6. Ubicación de la zona de estudio y tendido del sondeo geo eléctrico (Aguilar-Valdez, 2023) 36

Figura 3.7. Modelo electro estratigráfico del sondeo en la Av. Adolfo López Mateos (Aguilar Valdez, 2023) 36

Figura 3.8. Inspección fotográfica a) Ubicación de bloque de techo y de piso b) Avance del movimiento de la falla oriente c) pared lado sur d) fisuras producidas por la actividad de la falla. 37

Figura 4.1 Edificaciones cercanas a la falla orientes en las instalaciones del IDEA. En línea gruesa roja se indica la edificación (velódromo) sobre la que se concentró el estudio de daños. 40

Figura 4.2 Sondeos de refracción sísmica en las instalaciones del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes..... 42

Figura 5.1. Levantamiento topográfico a) Modelo 3d de la zona de estudio b) Secciones topográficas de las tres zonas de estudio c) Curvas de nivel (sin escala). 44

Figura 5.2. a) Ubicación de los tres sondeos de refracción sísmica en la zona de estudio b) Características de sondeo sur en la zona de estudio en sus dos diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros y 3 metros). 45

Figura 5.3. a) Escarpe de falla (Av. Adolfo López Mateos) b) Arreglo de geófonos 1.5 metros c) Aplicación de método de refracción sísmica d) Arreglo de geófonos 46

Figura 5.4 Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona uno de estudio con un arreglo de geófonos de 1.5 metros de separación, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales. 47

Figura 5.5 Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio uno con un arreglo de geófonos de 3 metros de separación, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales. 47

Figura 5.6. Diagrama de procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 1.5 metros y sobreponiendo perfiles topográficos del área de estudio. Los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la distancia a la fuente sísmica, los puntos azules unidos por una línea celeste representando el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia del promedio de velocidades. 48

Figura 5.7. Procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 3 metros, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la distancia a la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia de los datos. 49

Figura 5.8. a) Ubicación de zonas de estudio mediante sondeos de refracción sísmica b) Zona de estudio dos representando diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros y 3 metros)..... 50

Figura 5.9. a) Escarpe de falla y orientación del acomodo de los geófonos b) Ensayo de refracción sísmica c) Afectaciones de la falla a infraestructura del IDEA (trota pista) d) Limite del ensayo de refracción sísmica en la zona de estudio dos..... 50

Figura 5.10. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio dos con un arreglo de geófonos de 1.5 metros, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales. 51

Figura 5.11. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio dos con un arreglo de geófonos de 3 metros, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales. 52

Figura 5.12. Procesamiento de datos sísmicos, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica. La línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia del promedio de velocidades. 53

Figura 5.13. Procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 3 metros, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia de los datos. 53

Figura 5.14. a) Ubicación de zonas de estudio mediante sondeos de refracción sísmica b) Zona de estudio tres mediante diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros)..... 54

Figura 5.15. a) Escarpe de falla y orientación del acomodo de los geófonos b) Afectaciones de la falla c) Equipo utilizado para realizar sondeos de refracción sísmica d) Ensayo de refracción sísmica ensayo de refracción sísmica en la zona de estudio dos. 55

Figura 5.16. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio tres con un arreglo de geófonos de 1.5 metros. 56

Figura 5.17. Procesamiento de datos sísmicos, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja la tendencia de los datos. 57

Figura 5.18. Ubicación del velódromo y falla geológica. Los recuadros verdes en el velódromo muestran los sectores en los que se localizan bodegas y oficinas. 58

Figura 5.19. a) paso de la falla geológica por trota pista b) Sector del velódromo más cercano a la falla geológica..... 59

Figura 5.20. Ubicación de bodegas examinadas del velódromo. 59

Figura 5.21. Daños presentados en la bodega dos 60

Figura 5.22. Mediciones realizadas en elementos dañados de la bodega dos..... 61

Figura 5.23. Daños presentados en bodega cinco, a) y b) daños presentados en elementos confinados, c) y d) daños en losa..... 62

Figura 5.24. Mediciones realizadas en elementos dañados de la bodega cinco..... 63

Figura 5.25. Daños presentados en bodega ocho, a) y b) daños presentes en muros, c) y d) daños en elementos confinados, e) y f) daños en losa..... 64

Figura 5.26 Mapeo de fisuras y grietas en la pista del velódromo utilizando la técnica de fotogrametría..... 66

Figura 5.27. Mapa de densificación de fisuras y grietas. La representación del color rojo intenso nos indica una zona con acumulación alta de grietas y fisuras, el color amarillo indica presencia de grietas y fisuras con una separación mayor y el color azul representa zonas con nulas anomalías..... 67

Figura 6.1. Ancho de influencia variable de la falla oriente en el área del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes considerando únicamente los sondeos Geofísicos 70

Figura 6.2. Ancho de influencia variable de la falla oriente en el área del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes aplicando el factor de seguridad correspondiente 72

Resumen

La presente investigación tiene lugar en las instalaciones del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes (IDEA) ubicado en la ciudad de Aguascalientes, México, en donde existen alteraciones en el subsuelo y construcciones debido a la sobreexplotación de mantos acuíferos, proceso que ha generado hundimientos paulatinos en distintos puntos de la ciudad por el reacomodo de partículas del suelo y consecuentes deterioros en la infraestructura edificada, aun en aquellos puntos en los que dichas estructuras no se construyeron sobre la alineación de la falla, es por ello que el determinar la zona de influencia de la discontinuidad es necesaria para, entre otras cosas, una correcta planificación urbana y evitar riesgos a la población. Para establecer la zona de influencia se efectuaron 5 sondeos de refracción sísmica en 3 zonas de estudios distribuidos dentro de las instalaciones del IDEA obteniendo un ancho de afectación variable con la presencia de material perturbado desde los 7 metros hasta los 28 metros de distancia a partir de la línea de falla. Sin embargo, un análisis de afectaciones en una edificación tipo velódromo ubicada en la misma zona indicó una máxima densidad de afectaciones a los 20 y 30 metros. Analizando los resultados se observa que la afectación real de una falla puede ser mayor que la mostrada por técnicas de prospección del subsuelo, por lo que se propone la utilización de un factor de reforzamiento para la zona de estudio de 1.7 aplicado a los resultados de métodos geotécnicos y geofísicos.

1. Introducción

Uno de los principales peligros que ocasiona el hundimiento del terreno o subsidencia es el desarrollo de fallas superficiales y fracturas del terreno, siendo esto la causa de daños en viviendas e infraestructura (Hernández-Marín et al., 2015). Dicho fenómeno se ha presentado en distintas partes del mundo, como lo son: China, Estados Unidos, Italia, India, Tokio, Taiwán y México (Tomás et al., 2009). En México, se presenta el fenómeno de subsidencia en varios estados como lo son: Zacatecas, Guanajuato, Michoacán, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y el valle de Aguascalientes, principalmente (Figueroa-Miranda et al. 2018; Chaussard et al, 2014).

El suministro nacional de agua para sus distintos tipos de uso como lo son el urbano, agrícola e industrial se obtiene de diversas fuentes, proviniendo principalmente de acuíferos, los cuales están siendo explotados de formas inadecuadas, y por lo tanto generando problemas como lo es el hundimiento gradual del terreno siendo conocido como subsidencia. Dicho problema ocurre en el valle de Aguascalientes, como en varias partes del mundo.

En el estado de Aguascalientes se han observado varios factores condicionantes para la aparición de discontinuidades del terreno, por ejemplo la existencia de paleocanales, y la configuración del lecho rocoso, la fragilidad del suelo, entre otros. Dichos factores presentan una función pasiva en la formación de discontinuidades del terreno, mientras que un factor desencadenante es el abatimiento del nivel piezométrico, ya que induce a la consolidación de los rellenos granulares que conforma el sistema acuífero, y por lo tanto incrementando el esfuerzo efectivo. Las grietas y fracturas suelen generar afectaciones a diversas infraestructuras debido a las deformaciones provocadas (Pacheco-Martínez et al., 2012).

Bajo este contexto, esta tesis consiste en analizar la zona de la superficie del terreno en un tramo de la falla oriente, la cual ha sido reactivada por efectos de subsidencia y atraviesa las instalaciones del IDEA, provocando deterioro en estructuras colindantes. Para ello se utilizan métodos geofísicos no invasivos, con el fin de tener conocimiento de la conformación del suelo en la zona evaluada, realizando además un análisis de las edificaciones aledañas a la falla para poder correlacionar la influencia de dicha falla con los daños tangibles que existen en las estructuras.

1.1. Planteamiento del Problema de Investigación

El fenómeno denominado subsidencia se refiere a un desplazamiento vertical de la superficie del terreno, siendo una de las principales causas que la generan la sobreexplotación de mantos acuíferos.

La ciudad de Aguascalientes es una de las zonas en México con afectaciones debido al fenómeno de la subsidencia, dicho fenómeno está activo en varias áreas de la ciudad y debido a ello se han reactivado algunas fallas geológicas preexistentes, por lo que se deben de tomar medidas preventivas en esas zonas.

El fenómeno de subsidencia y en particular el fracturamiento asociado, puede provocar afectaciones severas en construcciones que van desde la ruptura de tuberías, lo cual provocaría contaminación en el subsuelo por derrame de sustancias residuales, migración de microorganismos y materia orgánica, hasta daños estructurales en edificaciones aledañas a dicho fenómeno, provocando deterioros en paredes, pisos, trabes, cimentaciones, y en ocasiones la pérdida total del inmueble, esto genera reparaciones costosas, devaluación del costo de las propiedades y al mismo tiempo, representa un peligro para los ocupantes de edificaciones aledañas, ya que están vulnerables a cualquier situación extraordinaria que se pueda presentar como colapso de techo o muros.

En este contexto, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿De qué manera se asociarían los daños en estructuras con la zona de influencia o afectación mecánica del suelo generada por fallas geológicas? ¿Es posible utilizar una metodología no invasiva como los métodos geofísicos para determinar la zona de afectación del suelo? ¿es posible correlacionar los resultados de los métodos geofísicos con el análisis de daños superficiales en construcciones?

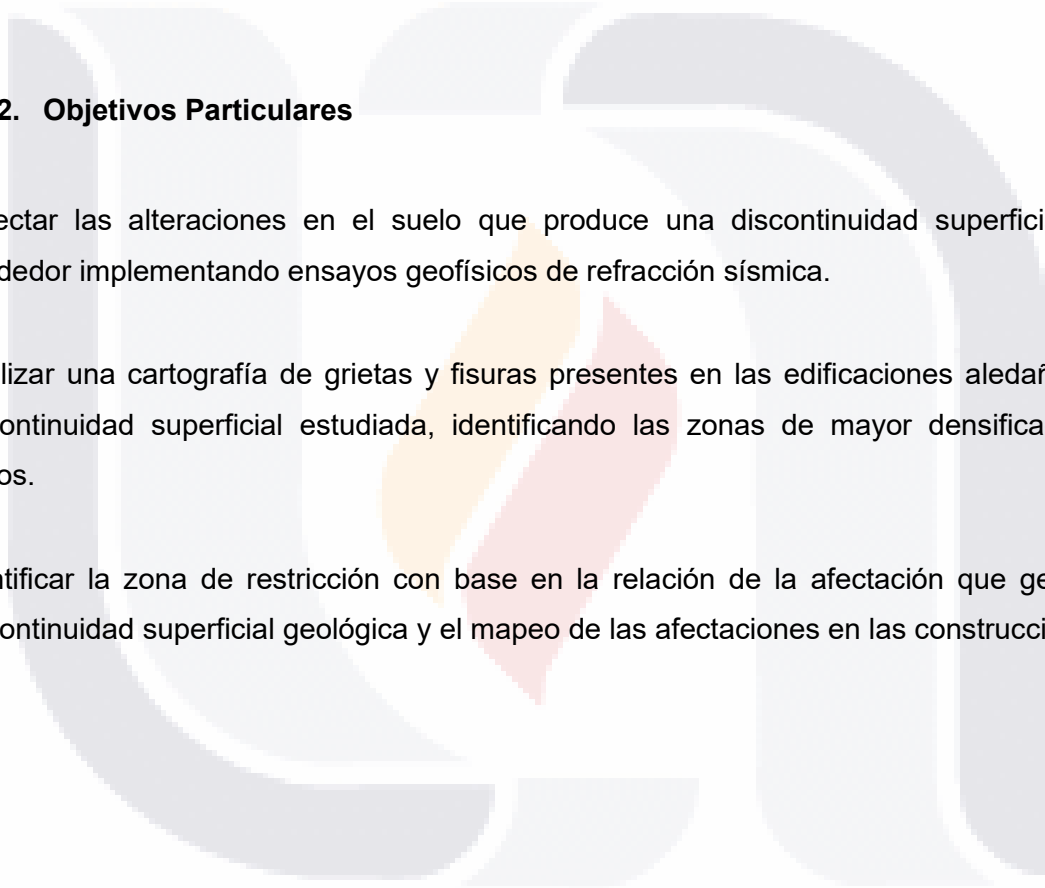
1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo principal de esta investigación es diseñar y aplicar una metodología integral para establecer la zona de afectación en construcciones por la influencia de una discontinuidad superficial que ha sido reactivada por subsidencia, tomando en cuenta ensayos geofísicos de refracción sísmica y análisis cuantitativo de los daños presentes en construcciones colindantes.

1.2.2. Objetivos Particulares

- Detectar las alteraciones en el suelo que produce una discontinuidad superficial a su alrededor implementando ensayos geofísicos de refracción sísmica.
- Realizar una cartografía de grietas y fisuras presentes en las edificaciones aledañas a la discontinuidad superficial estudiada, identificando las zonas de mayor densificación de daños.
- Identificar la zona de restricción con base en la relación de la afectación que genera la discontinuidad superficial geológica y el mapeo de las afectaciones en las construcciones.



1.3. Justificación

En la actualidad, las afectaciones en infraestructura de zonas urbanas a causa de las discontinuidades superficiales son muy recurrentes, sobre todo aquellas relacionadas con la subsidencia por sobreexplotación de mantos acuíferos, ya sea por reactivación de dichas discontinuidades o por la aparición de nuevas. La ciudad de Aguascalientes es un ejemplo de ello, existiendo afectaciones en viviendas, parques, zonas industriales e incluso en monumentos históricos. Debido a ello, es necesario realizar estudios pertinentes para entender mejor la dinámica de estas discontinuidades, por ejemplo, ubicar las zonas que afectan para contar con mayor seguridad estructural al momento de construir.

Con base en lo anterior esta investigación se efectúa en la zona donde se ubica el Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes, el cual está siendo afectado por la localmente denominada Falla Oriente, por ello es necesario el desarrollo de una investigación en la zona para planificar la influencia que produce dicha falla de manera que exista seguridad en construcciones futuras, ya que en la zona de estudio existe tráfico importante de personas. Dicho estudio puede servir de base para futuros análisis en zonas urbanas o suburbanas afectadas por discontinuidades superficiales.

1.4. Hipótesis

Las discontinuidades suelen producir alteraciones mecánicas del suelo a sus alrededores, generando daños en infraestructuras ubicadas a una distancia insegura de la línea de la discontinuidad. Para evitar esto, el empleo de ensayos geofísicos como lo es la refracción sísmica nos permite determinar las zonas del suelo afectado mecánicamente por la dinámica de la discontinuidad, además mediante un mapeo de las edificaciones cercanas a la discontinuidad se pueden identificar las zonas de mayor densificación de daños asociados a dicha discontinuidad. Con estas variables se puede proponer una zona de restricción total para la edificación de nuevas obras proponiendo un factor de seguridad el cual será aplicado a los datos proporcionados por los resultados del estudio.

2. Fundamentación Teórica

Las bases teóricas que fundamentan este proyecto de investigación están expuestas en este capítulo, tratando los temas de discontinuidades superficiales, que a partir de este punto podrán ser denominadas también como fallas geológicas, subsidencia y sondeos geofísicos enfocándonos en el método de refracción sísmica.

2.1. Definición de falla geológica

Una falla geológica tiene lugar cuando una masa de roca o suelo están sometidos a esfuerzos que exceden la capacidad de resistencia del material. Dichos esfuerzos pueden derivarse de varias causas, siendo la más común las fuerzas tectónicas actuantes, definiendo entonces a las fallas como discontinuidades de roca que pueden desarrollar un escarpe dividido en dos bloques, estos bloques a su vez suelen presentar movimientos paulatinos con el transcurrir del tiempo (Cesar, Rodríguez, et al., 2019; Iriando, 2009; Pacheco-Martínez et al., 2013).

Mecánicamente las fallas son el resultado de una deformación frágil, producto de movimientos repentinos y bruscos, lo que a nivel regional puede causar desastres naturales como terremotos, provocando ruptura de la superficie terrestre. Una falla se considera activa cuando ha tenido movimientos históricos en los últimos 10,000 años o sufren desplazamientos por causa de terremotos, aunque algunas fallas son capaces de moverse sin actividad sísmica (Babín y Gómez, 2010; Instituto nacional de prevención sísmica [INPRES], 2015).

2.1.1. Características de una falla geológica

A continuación, se describirán las principales características que comprende una falla geológica, según Tarbuck et al., (2005).

- Salto de falla: Distancia entre un punto dado de uno de los bloques y el correspondiente en el otro, tomada a lo largo del plano de falla.
- Escarpe: Distancia vertical entre las superficies de los dos bordes, creado por el movimiento en la longitud de una falla.
- Plano de falla: Es la superficie de ruptura y el desplazamiento de los bloques, definido por las características geométricas rumbo y buzamiento (echado).
- Dirección o rumbo: Se refiere al ángulo formando entre el plano de falla y el eje norte magnético de la Tierra, se expresa en valor de ángulo con respecto al norte.

- Buzamiento o inclinación: Ángulo de un plano geológico que forma el plano de falla con la horizontal, Se debe medir en perfil.

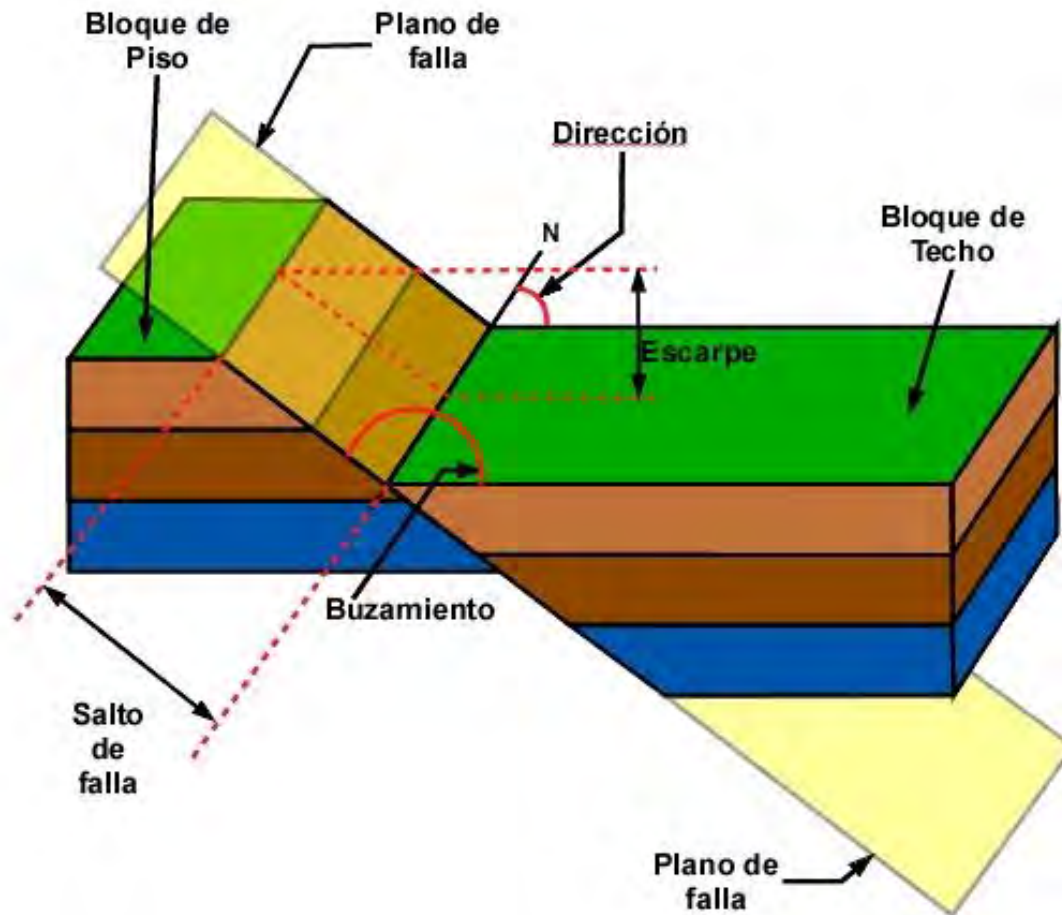


Figura 2.1 Característica de una falla geológica (Redibujado de (Universidad Técnica de Loja, 2008)).

2.1.2. Tipos de falla geológica

Las fallas se clasifican según sea la dirección del desplazamiento de la roca que corta, existen tres tipos de fallas principales (INPRES, 2015).

- Falla normal o directa: son provocadas por esfuerzos de tensión con importante componente horizontal, esto se debe a que las fuerzas inducidas en las rocas son perpendiculares a la línea de ruptura superficial de la falla, y el movimiento es vertical respecto al plano de falla. El techo es el bloque que se encuentra por encima del plano de falla y se desliza hacia abajo; El piso es el bloque que se encuentra por debajo del plano de falla y asciende (INPRES, 2015; Iriondo, 2009).

- b) Falla inversa: Estas fallas son generadas por compresión horizontal provocando un levantamiento del suelo haciendo subir un bloque rocoso por la presencia de un buzamiento inferior a 45° , el bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso, también toman el nombre de Cabalgamiento (INPRES, 2015).
- c) Falla de desgarre, transcurrentes o de desplazamiento de rumbo: Se originan por esfuerzos de torsión, desarrollándose a lo largo de planos verticales y el movimiento de bloques es horizontal, se desarrollan en los límites transformantes de placas tectónicas (INPRES, 2015; Iriundo, 2009).

A su vez existen dos tipos de fallas transcurrentes:

- Laterales de derecha o dextrales: El movimiento relativo de los bloques es hacia la derecha, es decir; al colocarnos en un bloque observamos que existe un desplazamiento a la derecha del otro bloque.
- Laterales izquierdas o sinestrales: El movimiento relativo de los bloques es hacia la izquierda, es decir; el observador aprecia un movimiento a la izquierda del bloque.

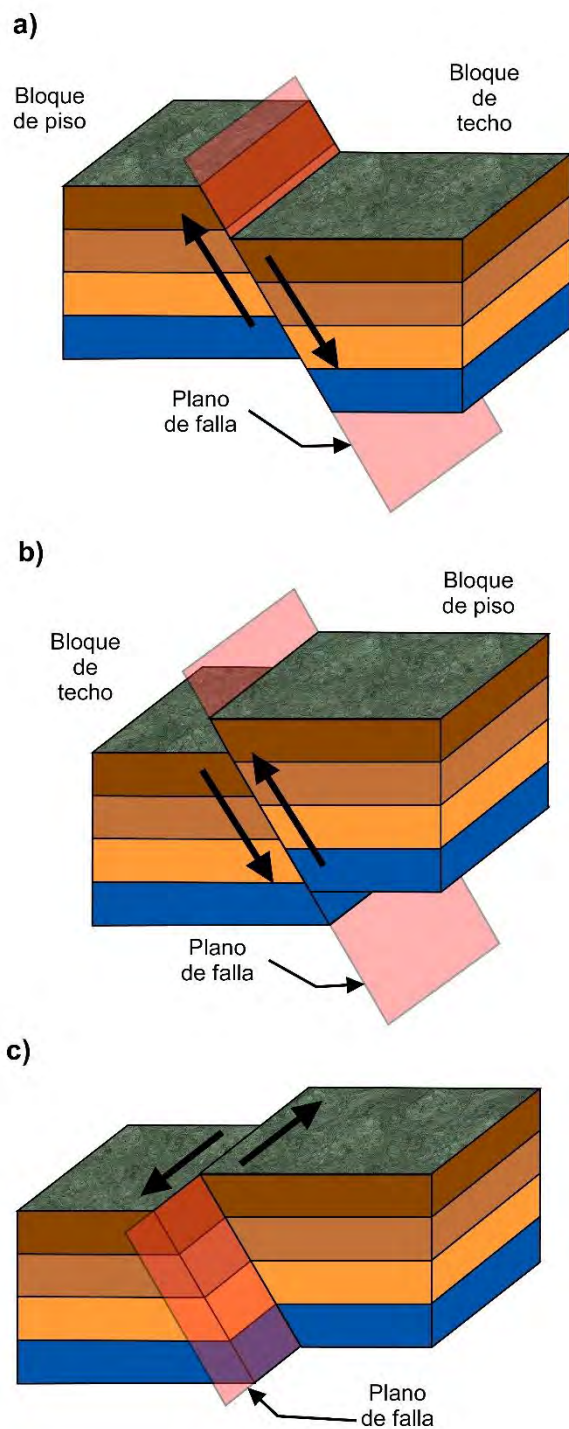


Figura 2.2 Tipos de fallas geológicas a) plano de una falla normal b) Plano de falla inversa c) Falla de desplazamiento de rumbo (Redibujado de (Rodríguez et al., 2019)).

2.2. Subsistencia

El Glosario de Geología (2020), Define la subsidencia como:

“Un hundimiento progresivo del fondo de una cuenca sedimentaria durante un intervalo de tiempo prolongado, esto genera la consolidación y compactación del estrato lo que se refleja en movimientos verticales de la superficie terrestre”.

Dicho fenómeno produce diversos daños como lo es el repentino colapso de la superficie terrestre, hundimientos lentos e inundaciones por variación de nivel superficial. Este fenómeno no suele ocasionar víctimas mortales pero puede producir daños económicos significativos. Aunque ocurre en un relativamente largo periodo de tiempo los daños provocados en estructuras son difíciles de controlar. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) incluyó este fenómeno en el programa Década Hidrológica Internacional desde 1964 (Daito y Galloway, 2015; de Lira-Gómez et al., 2015; Tomás et al., 2009).

La subsidencia se ha dado a conocer desde principios del siglo pasado en países como Estados Unidos, Japón, Italia, China y México entre otros (Hernández-Marín et al., 2015; Holzer, 1984; Huang et al., 2012). En México se ha reportado la presencia de este fenómeno, siendo algunas de las principales zonas afectadas: El valle de Querétaro, el valle de San Luis Potosí, el valle de México, el valle de Toluca, el valle de Morelia, los valles de Bajío como lo son Celaya e Irapuato y en el valle de Aguascalientes, este último experimenta un proceso de un hundimiento debido a la compactación de sedimentos no consolidados provocados por la sobreexplotación de mantos acuíferos (Holzer, 1984; Luna-Villavicencio et al., 2020; Pacheco-Martínez et al., 2012).

La ciudad de Aguascalientes presenta diversos sectores con hundimientos debido a variaciones de esfuerzos, ocasionado por la sobreexplotación de acuíferos, generando la pérdida de presión de poro y aumento del esfuerzo efectivo, y con ello, una disminución de la relación de vacíos en el subsuelo facilitando su consolidación (Holzer, 1984; Zermeño et al., 2005).

Las discontinuidades generadas por efectos de subsidencia se pueden catalogar en fallas superficiales siendo aquellas que generan desplazamientos tanto verticales como horizontales y en fracturas las cuales solo producen desplazamiento horizontal (Holzer, 1984; Luna-Villavicencio et al., 2020).

2.2.1. Causas que generan la subsidencia

El efecto de la subsidencia se manifiesta en la superficie debido a mecanismos de deformación en el subsuelo, esto se genera por causas antropogénicas y naturales las cuales se describen a continuación más adelante en esta tesis (Sánchez-Currihuinca, 2016; Tomás et al., 2009):

2.2.1.1. Causas naturales de subsidencia

Según Sánchez Currihuinca (2016) las principales causas naturales que provocan la subsidencia son:

➤ **Pérdida de humedad por oscilación climática (sequías)**

La subsidencia afecta principalmente a suelos blandos, y pueden ser causado por una profundización considerable del nivel freático de los acuíferos, pudiendo ser provocado en una sequía. La pérdida de humedad del suelo por cambio climático se vincula con los periodos secos con mayor impacto que los periodos húmedos, debido a ello, los eventos de sequía ocasionan pérdida de humedad, lo cual a su vez provoca espacios de aire en el subsuelo generando estratos no consolidados, resultando en asentamientos superficiales (Sánchez Currihuinca, 2016).

➤ **Subsidencia inducida por sismos**

La tierra libera energía de manera natural en forma de sismos, esto ocurre cuando las placas tectónicas interactúan una con otra provocando una acumulación de esfuerzos en la región y generando vibraciones que propician el surgimiento de grietas superficiales ocasionando la densificación de terrenos granulares sueltos lo cual, conlleva un reacomodo de partículas hasta alcanzar una estructura más compacta, finalmente generando movimientos verticales del terreno (Jaime et al., 2022; Tomás et al., 2009).

La ciudad de Aguascalientes tiene una peligrosidad sísmica baja debido a la su lejanía con la zona de subducción del Pacífico, aunque según Pacheco-Martínez et al. (2013) la actividad sísmica podría ser subestimada ya que se potencializa debido a la sobreexplotación de mantos acuíferos provocando rompimiento de estratos rígidos o derrumbes de paredes en la formación de fracturamiento superficiales.

➤ **Licuefacción**

El fenómeno de la licuefacción se genera en suelos no consolidados, no cohesivos y saturados los cuales reducen su resistencia debido a vibraciones generadas por sismos u otro

fenómeno similar, esto ocasiona densificación del suelo, generando deformaciones y asentamientos diferenciales en la superficie (Henríquez-Pantaleón, 2007; Sánchez-Currihuinca, 2016).

2.2.1.2. Causas antropogénicas de subsidencia

Las principales actividades económicas desarrolladas por los seres humanos pueden resultar en efectos que conllevan al proceso de subsidencia, dichas actividades se describen a continuación:

➤ **Sobreexplotación de acuíferos**

El crecimiento poblacional que ocurre en las ciudades genera mayor demanda del vital líquido, lo que puede provocar que las aguas superficiales sean insuficientes para satisfacer dicha necesidad, siendo indispensable hacer uso del agua subterránea mediante pozos, por lo que la subsidencia se genera por la sobreexplotación de mantos acuíferos ocasionando estrés hídrico. La subsidencia también se considera un peligro geológico afectando a muchas ciudades en el mundo, esto induce a la formación de grietas y fisuras superficiales dañando a viviendas e infraestructura urbana (Hernández-Marín et al., 2015; Hernández-Marín y Burbey, 2012; Jaim et al., 2022).

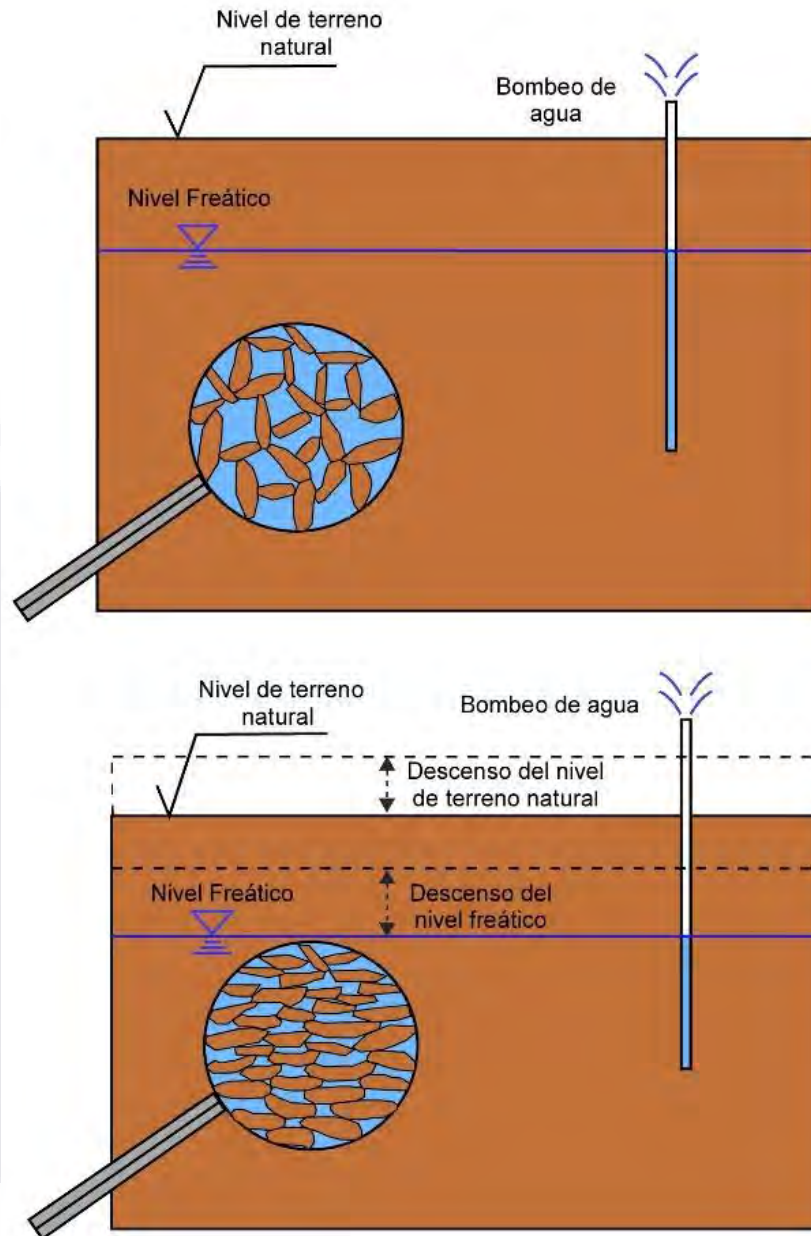


Figura 2.3. Efecto de subsidencia por abatimiento de mantos acuíferos (Redibujado de Tomás et al., (2009)).

Una cuenca sedimentaria que contiene rellenos granulares tiene potencial a ser consolidados como se observa en la figura 2.3, esto se genera debido a la falta de sustentación hídrica en el acuífero, generando deformaciones tanto en dirección vertical como horizontal en el subsuelo, dicho fenómeno se conoce como subsidencia por extracción de agua (Burbey, 2002; Pacheco-Martínez, 2007).

Un acuífero se encuentra sobreexplotado cuando el volumen de agua extraída del mismo es mayor que su recarga, provocando descensos del nivel piezométrico. En este sentido, las zonas con mayor posibilidad para la sobreexplotación del agua del subsuelo son las que contienen acuíferos principalmente granulares, ya que este medio tiene características para un muy buen aprovechamiento hídrico debido a su relativamente alta permeabilidad (Pacheco-Martínez, 2007; Rodríguez-Castillo, 2006). Entonces, al existir un descenso del nivel freático quedan intersticios con aire, siendo más susceptible a la formación de fisuras y experimentar un colapso del nivel de terreno (figura 2.4) por las causas siguientes (Sánchez-Currihuinca, 2016):

- Por la gravedad terrestre.
- Por el peso de construcciones superficiales.
- Por el peso de maquinaria u objetos que se encuentren en la superficie.

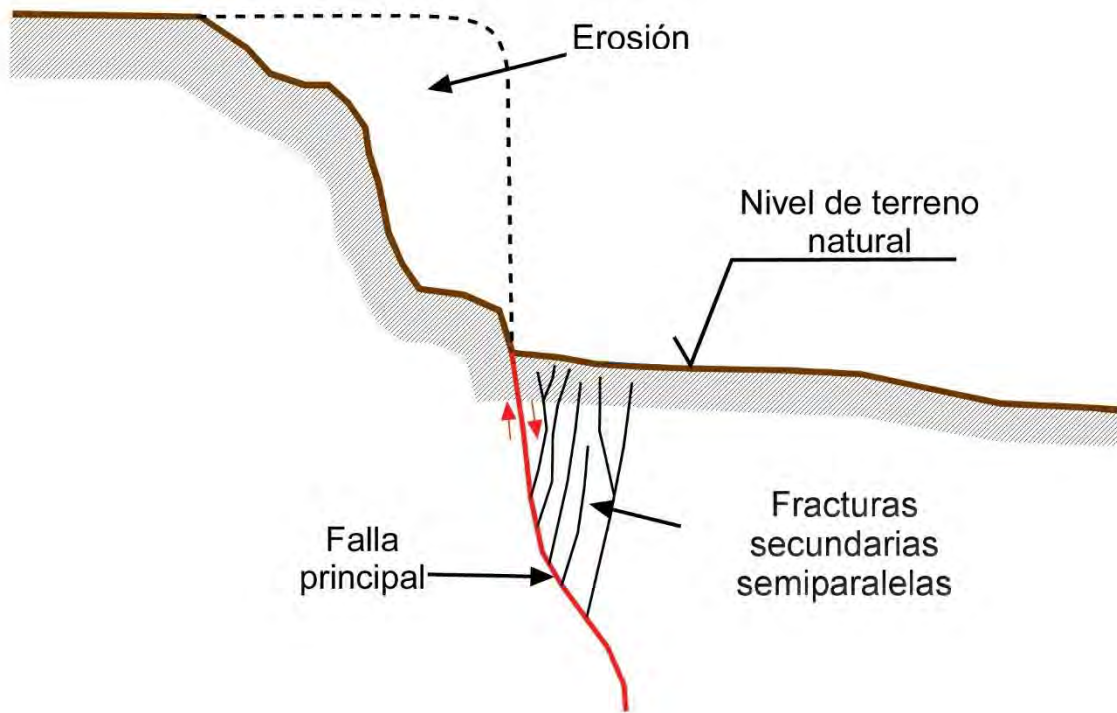


Figura 2.4 Mecanismo de falla (Redibujado de González y Carrizo, (2003))

2.2.2. Formación de fisuras inducida por bombeo en presencia de fallas preexistentes

La formación de fisuras adjuntas a una discontinuidad preexistente incitado por extracción de agua se agrupa en tres modelos según Hernández-Marín y Burbey (2010):

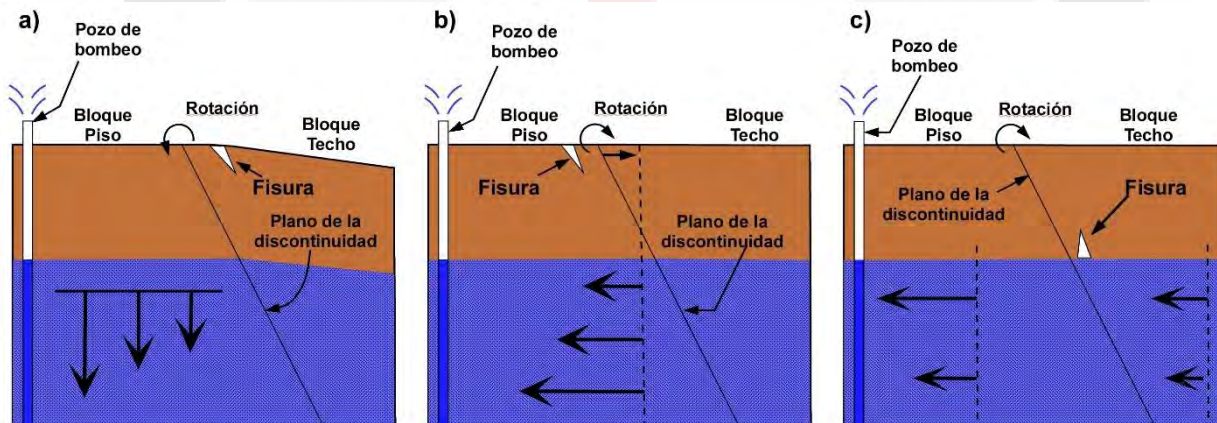
➤ Modelo de la viga de flexión.

El modelo de la viga de flexión (figura 2.5a) indica que las fisuras se producen debido a hundimientos crecientes desde el borde del graben hacia el centro causadas por tensión, debido a ello existe una acción de rotación del plano de falla a causa de los esfuerzos provocados por la extracción de agua subterránea induciendo la aparición de fisuras sobre la superficie debido a deformaciones (Bouwer, 1977; Hernández-Marín y Burbey, 2010).

➤ Modelo de Helm (1994).

El modelo de Helm (Figura 2.5b) actúa debido a fuerzas de flujo horizontales causando una extensión superficial a través de planos verticales de debilidad, incitadas debido al bombeo, causando movimientos diferenciales horizontales y verticales lo que provoca una rotación del plano de falla opuesta al modelo de la viga de flexión, dicho modelo explica únicamente el desarrollo de fisuras en el bloque donde se realiza la extracción de agua (Helm, 1994; Hernández-Marín y Burbey, 2010).

Figura 2.5. Modelos hipotéticos del mecanismo de fisuración a) Modelo de la viga de flexión b) Modelo de Timón c) Modelo de desplazamiento horizontal



Modelo de discontinuidad de desplazamiento horizontal (Redibujado de Hernández-Marín y Burbey, (2010)).

➤ Modelo de discontinuidad de desplazamiento horizontal

Este modelo (Figura 2.5c) establece que con la extracción de agua subterránea se deforma el material que comprende el acuífero, ocasionando desplazamientos en planos de debilidad generando fallas en la zona vadosa debido a una acumulación de tensiones las cuales serán expresadas como fisuras en la superficie (Sheng, 2003).

2.3. Métodos Geofísicos

La geofísica se entiende como el uso de la física para el estudio de la tierra, abarcado desde la superficie terrestre hasta el núcleo interno, siendo la geofísica ambiental la que se encarga de investigar los primeros metros de la corteza terrestre, donde los fenómenos geológicos afectan las actividades del hombre y en donde las actividades del hombre causan algún efecto en el medio geológico. Así, la correcta aplicación de los métodos de prospección geofísica depende de varias propiedades como lo son la densidad, propiedades acústicas y condiciones ambientales, dichos métodos se basan en la interpretación de perfiles estratigráficos de la zona de estudio, midiendo la respuesta del suelo al impulso geofísico exponiendo con ello, la profundidad del subsuelo y sus propiedades (Akintorinwa y Adesoji, 2009; Groves et al., 2011). Uno de esos métodos aplicables a los geomateriales es el método sísmico.

2.3.1. Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos se basan en el análisis de la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo, dichas ondas se inducen de forma controlada y viajan por el subsuelo hasta experimentar el fenómeno de refracción o reflexión, que las deflecta a la superficie, donde, un conjunto de instrumentos llamados geófonos captan el arribo de estas ondas. Derivado de todo este proceso; se pueden medir los tiempos de arribo a los geófonos con respecto a la emisión desde la fuente, con ello es posible determinar las características del medio como el espesor y la composición de los estratos geológico e identificar propiedades físicas en unidades geológica (Martínez-Pagan, 2014).

Las ondas sísmicas son un conjunto de ondas de energía mecánica que se propagan a todas direcciones a partir de su emisión en una fuente sísmica. Existen dos grupos, las ondas volumétricas siendo las ondas primarias u ondas P y las ondas secundarias u ondas S, y las ondas superficiales las cuales no son capaces de penetrar a una cierta profundidad del subsuelo,

existiendo dos tipos, las ondas Rayleigh y las ondas Love; este tipo de ondas son dispersivas por lo que se utilizan para explorar la estructura del subsuelo (Luna-Villavicencio, 2018; Martínez-Pagan, 2014).

La velocidad de las ondas sísmicas es diferente dependiendo del material en el cual se propagan, siendo su densidad un parámetro determinante. Las tablas 2.1 y 2.2 muestran las velocidades de ondas sísmicas para diferentes geomateriales.

Tabla 2.1 Velocidad promedio de ondas secundarias u ondas S, correspondiente para 30 m de profundidad (Schmidt, 2010).

Tipo de material	V_s 30 (m/s)
A (Roca sana)	>1500
B (Roca)	760 - 1500
C (Roca muy fracturada y alterada)	360 - 760
D (Rellenos compactos)	180 - 360
E (Rellenos sueltos)	<180

Tabla 2.2 Velocidades de onda P para diferentes materiales (Martínez-Pagan, 2014).

Tipo de material	V_p (m/s)
<i>Materiales sin consolidar</i>	
Arena (Seca)	200 - 1000
Arena (Saturada)	1500 - 2000
Arcilla	1000 - 2500
Arcilla glaciár	1500 - 2500
Permafrost	3500 - 4000
<i>Roca sedimentaria</i>	
Areniscas	2000 - 6000
Areniscas del Terciario	2000 - 2500
Areniscas del Carbonífero	4000 - 4500
Cuarcitas del Cámbrico	5500 - 6000
<i>Calizas</i>	
Creta del Cretácico	2000 - 2500
Oolita del jurásico y calizas bioclásticas	3000 - 4000
Caliza del Carbonífero	5000 - 5500

Dolomías	2500 – 6500
Sal	4500 – 5000
Anhidrita	4500 – 6500
Yeso	2000 – 3500
<i>Roca metamórfica/Ígneas</i>	
Granito	5500 – 6000
Gabro	6500 – 7000
Roca ultramáficas	7500 – 8500
Serpentinina	5500 – 6500
<i>Fluidos intersticiales</i>	
Aire	300
Agua	1400 – 1500
Hielo	3400
Petróleo	1300 - 1400
<i>Otros materiales</i>	
Acero	6100
Hierro	5800
Aluminio	6600
Hormigón	3600

2.3.1.1. Método de refracción sísmica

El método de refracción sísmica provee un medio confiable para el estudio del subsuelo en 2 dimensiones, con la identificación de los primeros arribos de onda en los geófonos colocados en un arreglo lineal, se elaboran las curvas dromocrónicas (gráficos tiempo vs distancia), donde cada pendiente de la recta representa un refractor. Para la localización de la franja de terreno perturbada por fallas o fracturas, se espera un retardo de la onda sísmica representada en el gráfico de dromocronas como una recta con mayor pendiente.

El método consiste en ubicar la zona de influencia y colocar una serie de transductores de velocidad o geófonos en la superficie, los cuales se colocan sobre la superficie con una separación equidistante entre ellos y la fuente, estos sensores registran el arribo de la onda sísmica a partir de la generación de una fuente sísmica artificial, dichas fuentes pueden ser generadas desde con un martillo hasta con una explosión controlada, como se muestra en la figura 2.6. La onda sísmica P generada durante el proceso se desplazan a través del subsuelo pudiendo alcanzar una superficie de transición entre diferentes medios, por lo tanto cambiando su velocidad de propagación, si el cambio implica un incremento de la velocidad, la onda

entonces se refracta con la velocidad del medio en transición hacia la superficie (Groves et al., 2011; Vargas, 2019).

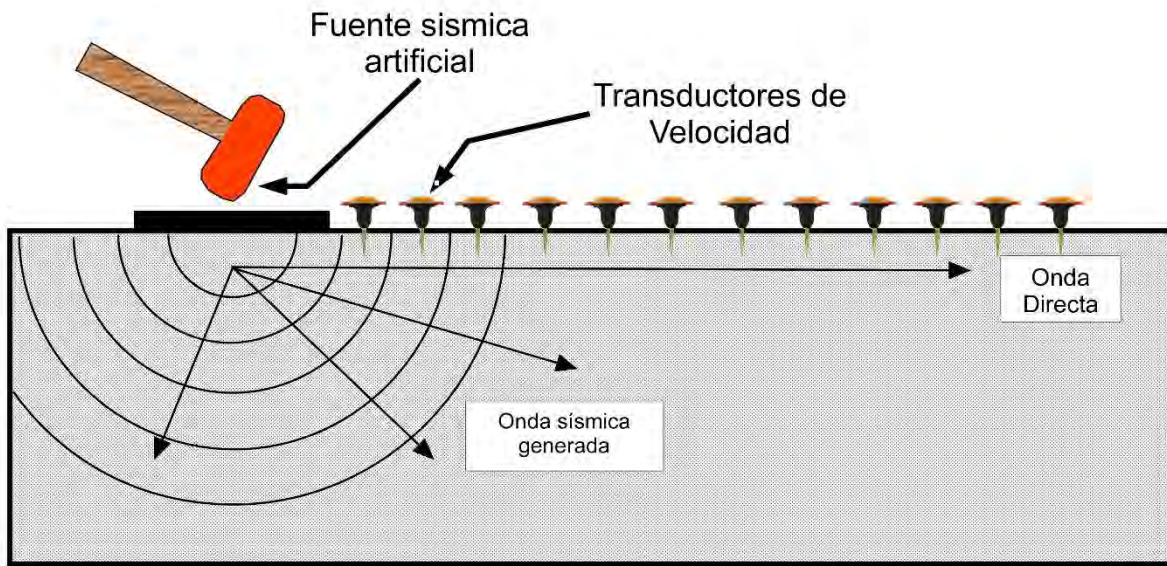


Figura 2.6 Arreglo de geofonos y propagación de la onda sísmica artificial (Redibujado de (Burger et al., 2006)).

La velocidad de propagación de las ondas a través de un material homogéneo está dada por las siguientes ecuaciones (Groves et al., 2011):

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

Donde:

V_p = Velocidad de onda P

V_s = Velocidad de onda S

E = Modulo de Young

ν = Relación de Poisson

G = Modulo de cortante

ρ = Densidad de masa

A partir de las velocidades de ondas sísmicas, se pueden estimar los cuatro módulos elásticos de los materiales: Relación de Poisson, módulo de Young, Modulo de rigidez y módulo de Bulk, (Álvarez y Aceves, 2003).

Relación de Poisson (ν)

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (2.3)$$

Módulo de rigidez (G)

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.4)$$

Módulo de Young (E)

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.5)$$

Módulo de compresibilidad

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.6)$$

La configuración de la posición de los geófonos para el estudio de un medio de dos estratos con diferentes velocidades de propagación y, por lo tanto, diferentes densidades, se representa en la figura 2.7, en la cual el estrato superficial permite una velocidad de onda baja " V_1 " en comparación con la del estrato dos " V_2 ", debido a esto, los geófonos cercanos a la fuente sísmica artificial identifican como primer evento la onda directa a través del estrato uno, inmediatamente después la onda sísmica tiene contacto con la superficie de transición y comienza a actuar con el fenómeno de reflexión interna, por lo que su velocidad de propagación aumenta y esto hace que la onda sísmica pueda llegar a los geófonos siguientes, debido a que los geófonos se ubican igualmente espaciados la velocidad de propagación es constante pudiendo visualizar un cambio de pendientes con respecto a V_1 y V_2 , teniendo una inclinación menor ya que la velocidad de propagación aumenta (Groves et al., 2011; Vargas, 2019).

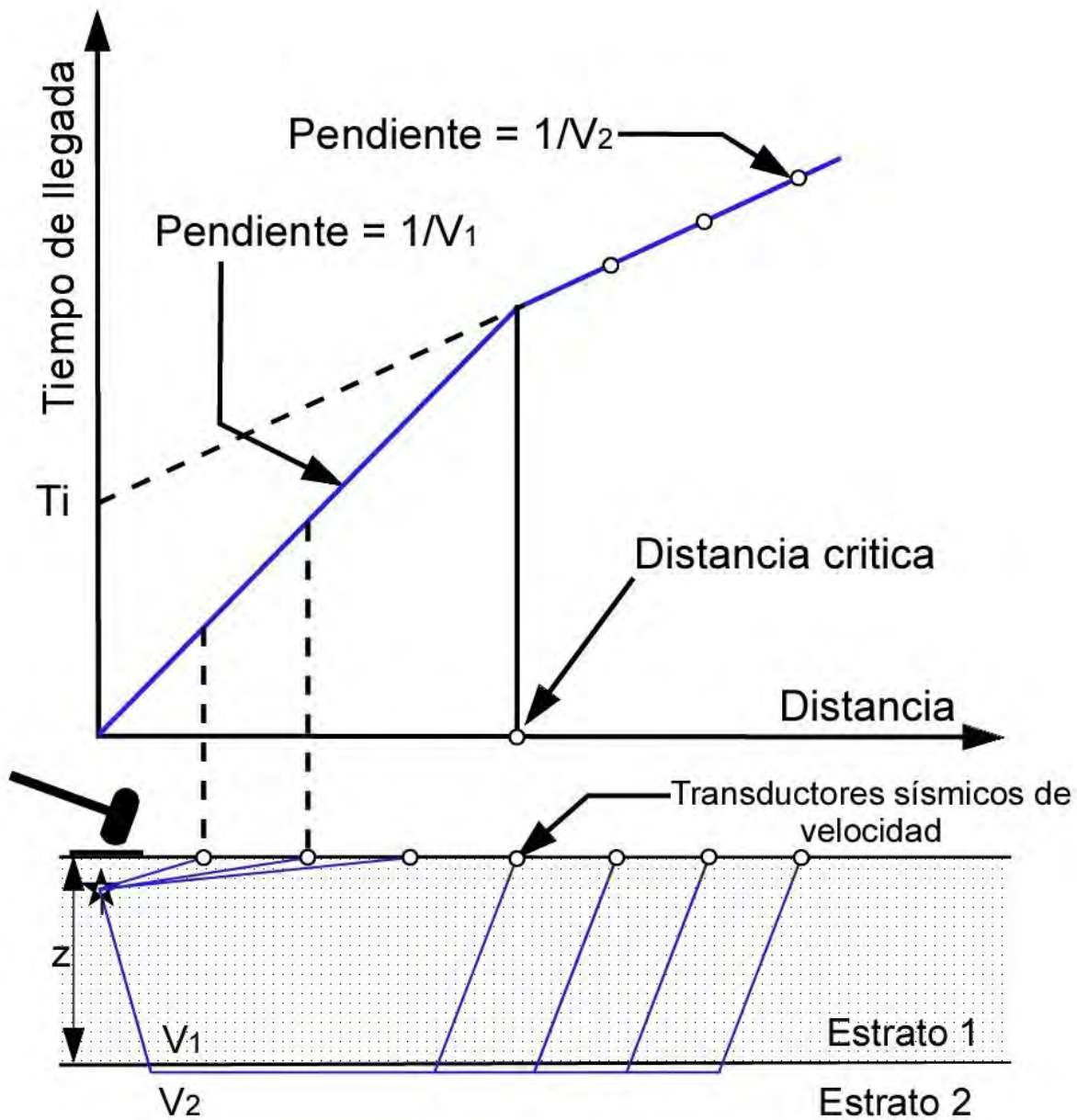


Figura 2.7 Configuración de geófonos para el estudio de dos estratos con el método de refracción sísmica (Redibujado de (Luna-Villavicencio, 2018)).

Los datos obtenidos mediante el sismograma se representan gráficamente a través de dromocronas (Figura 2.8), las cuales son primordiales para la interpretación de los datos sísmicos (Martínez-Pagan, 2014). Por otro lado, es normal que en el método de refracción sísmica las pendientes sean menores conforme la onda avanza, si ocurre un cambio repentino en la pendiente se considera una anomalía en el suelo.

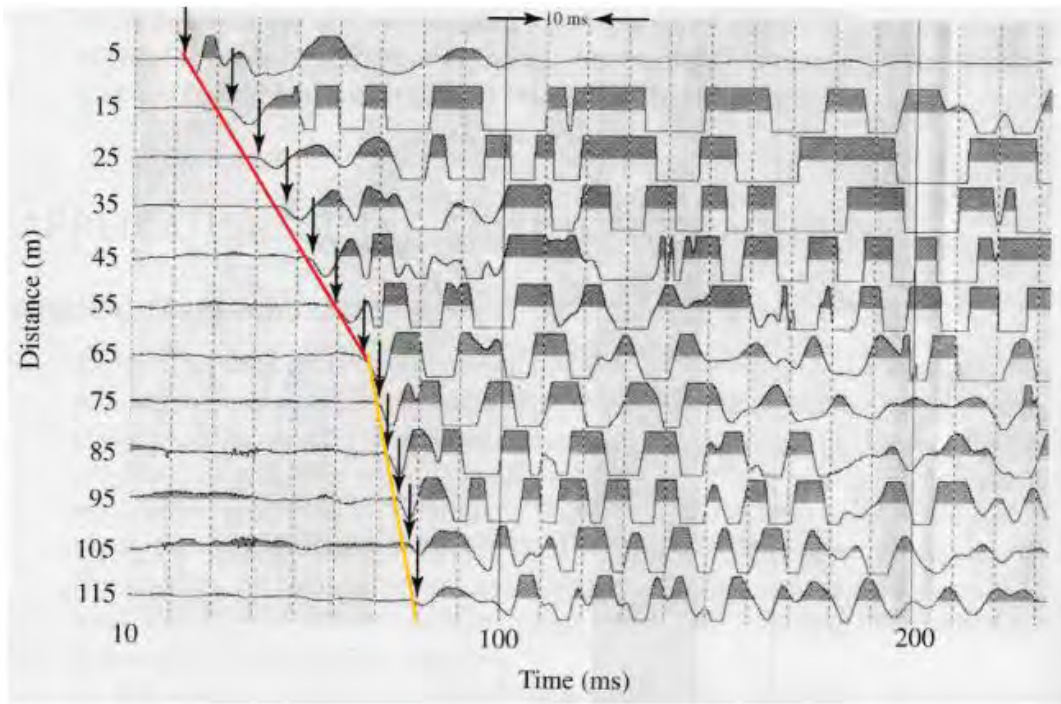


Figura 2.8 Grafico distancia vs tiempo (Vargas, 2019).

Una vez establecido las velocidades de las capas, se puede calcular la profundidad del cambio de estrato (z) con la siguiente expresión.

$$z = \frac{T_i V_2 V_1}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad 2.3$$

Donde:

z = Profundidad

T_i = Tiempo de llegada con respecto a la pendiente de la velocidad dos

V_1 y V_2 = Velocidad uno y dos

3. Estado actual del conocimiento

3.1. Análisis del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Aguascalientes

En el estado de Aguascalientes, el estudio de los daños en edificaciones ocasionados por el fenómeno de subsidencia se ha vuelto más común en los últimos años, debido al crecimiento poblacional significativo, los cuales según el INEGI se incrementó de 944,300 habitantes para el año 2000 a 1,425,600 habitantes para el año 2020, incrementando como consecuencia la extracción de agua subterránea y a su vez, debido a ello, provocando la aparición de subsidencia diferencial por dicho fenómeno y como resultado la aparición y/o reactivación de fallas y fracturas superficiales (Pacheco-Martínez et al., 2013), pudiendo afectar a las construcciones que se localicen sobre la zona de influencia de dichas estructuras geológicas, pudiendo resultar dañadas debido a los esfuerzos derivados de la actividad de la falla.

En el valle de Aguascalientes existe una sobreexplotación del acuífero desde finales de la década de 1970, y con ello la caída del nivel freático. Por ejemplo, para el año 2006 la profundidad máxima registrada del nivel freático rondaba en 115 m, y para el 2010 disminuyó hasta 180 m., Por su parte según Aranda-Gómez et al. (1985) el fenómeno de agrietamiento en el valle se observó a partir de 1980 sin presencia de desniveles apreciables entre grietas obteniendo una carta de agrietamiento para dicho año representado en la figura 3.1a, aunado a esto el municipio de Aguascalientes realizó una actualización de dichas carta en el año 2002 representado en la figura 3.1b, el avance del agrietamiento del valle es notable considerando que para este último año existe desniveles apreciables generados por efectos de subsidencia presentando una reducción del volumen de vacíos del suelo, en la actualidad el Sistema de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG) es el organismo encargado de la actualización de cartografía y monitoreo de las grietas, fisuras y fallas en el estado (figura 3.1c) (Arroyo-Contreras y Zermeño-de-León, 2004; Zermeño et al., 2005). Por otro lado, Cigna y Tapete (2021), estudiaron la tasa de deformación del suelo en el valle de Aguascalientes con ayuda de la herramienta satelital InSAR, determinando hundimientos a razón de los 12 cm/año.

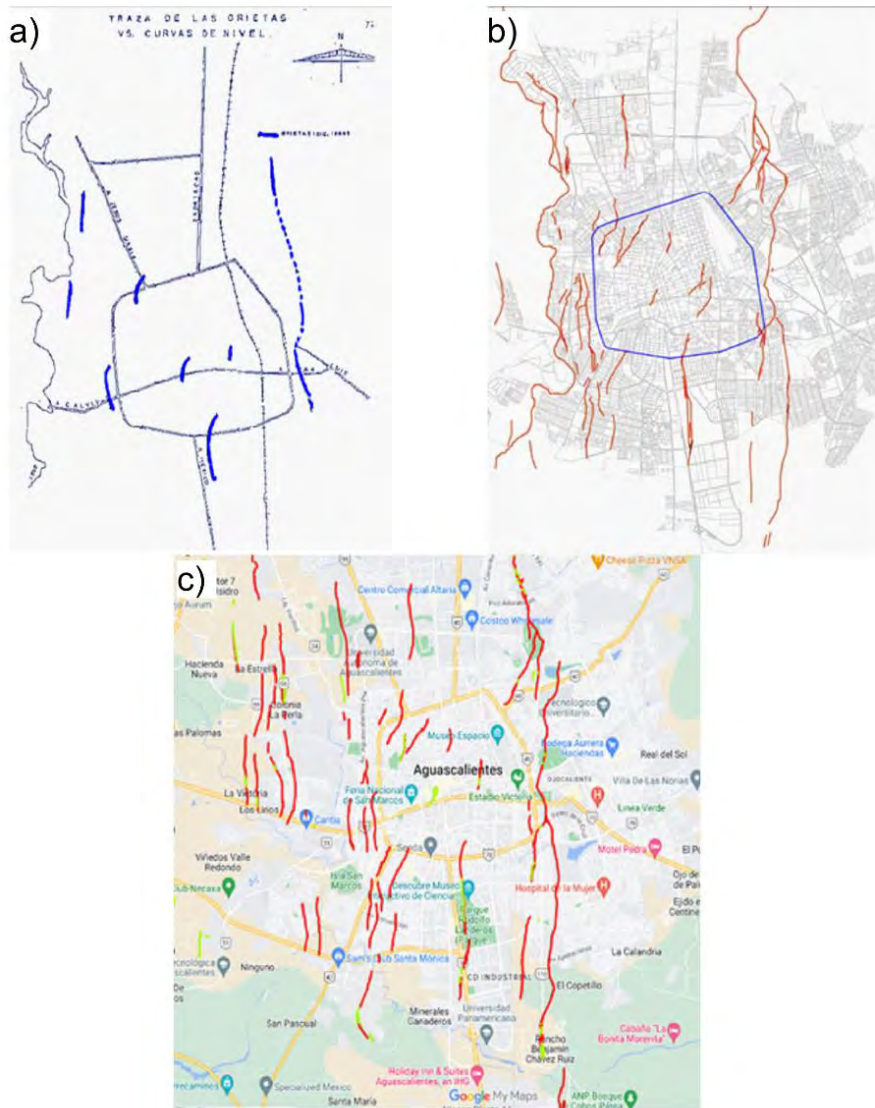


Figura 3.1. Avance de la subsidencia en el valle de Aguascalientes. A) Traza de grietas en el año 1985 (Aranda Gómez & Aranda Gómez, 1985) b) traza de grietas en el año 2002 (Arroyo Contreras & Zermeño de León, 2004) c) traza de grietas actualizada por parte del SIFAGG.

El fenómeno de subsidencia del valle de Aguascalientes se potencializa por factores ajenos a la sobreexplotación del acuífero, como lo son la topografía irregular del lecho rocoso y la alta compresibilidad del sistema de acuífero granular (Pacheco-Martínez et al., 2013). Para ello, se han ejecutado actividades para mitigar la deformación superficial a causa de subsidencia, como por ejemplo el control de infiltración con agua superficial, la disminución de los volúmenes de extracción de agua y la implementación de recarga artificial (Acuña-Lara et al., 2020; Cortéz,

2012), pero todas estas actividades han sido ineficientes debido al crecimiento poblacional existente, ya que se aumenta la demanda del vital líquido causando en un futuro tasas muy grandes de hundimiento, por lo tanto es importante adquirir mejor comprensión de los mecanismos que influyen al hundimiento y mecanismos para delimitar riesgos con base en zonas de influencia en las áreas afectadas por este fenómeno (Pacheco-Martínez et al., 2013).

3.2. Criterio de área de afectación aledaña a fallas y grietas

Al señalar un área de afectación derivadas de fallas geológicas reactivadas por efectos de subsidencia, se busca especificar la zona de peligro adyacente a dicha falla y definir los usos particulares del suelo para el que es apto la zona de estudio dependiendo el potencial de ruptura de la superficie, todo ello para definir de forma objetiva la distancia de restricción segura (McCalpin, 1987).

McCalpin (1987), menciona en su investigación “el ancho horizontal del área afectada depende en buena medida a la topografía anterior a la ruptura” (p. 47). En su investigación, este autor realizó un análisis de 40 registros a lo largo de la falla con lo cual demostró que el escarpe y el buzamiento son predecibles, por el contrario el salto de falla tiene bastante variabilidad. Por otro lado, este mismo autor indica que cuando el fracturamiento ocurre dentro de un graben se debe tener en cuenta un criterio de daños según los desplazamientos superficiales, y propone que si éstos son menores a 0.1 m se deben considerar daños leves, para el rango de 0.1 m – 0.3 m, se considera daño severo y de 0.3 m – 0.6 m se considera destrucción completa o colapso.

Es necesario considerar diferentes variables para establecer un rango de seguridad, por lo que Trejo-Corona (2021), tomó en cuenta factores como la distancia a la falla, las características de los daños de las edificaciones y los asentamientos visibles. para ello, este autor analizó las edificaciones deterioradas por tres diferentes fallas, la evaluación de cada falla consistió en visualizar las afectaciones de las viviendas, una de las fallas analizadas está localizada en el IDEA, donde se obtuvo el relieve y modelos 3D de la zona afectada, al mismo tiempo analizó las estructuras cercanas, obteniendo un asentamiento diferencial de 0.761 m, una pendiente de 17.41% y una extensión de daño de 6.085 m.

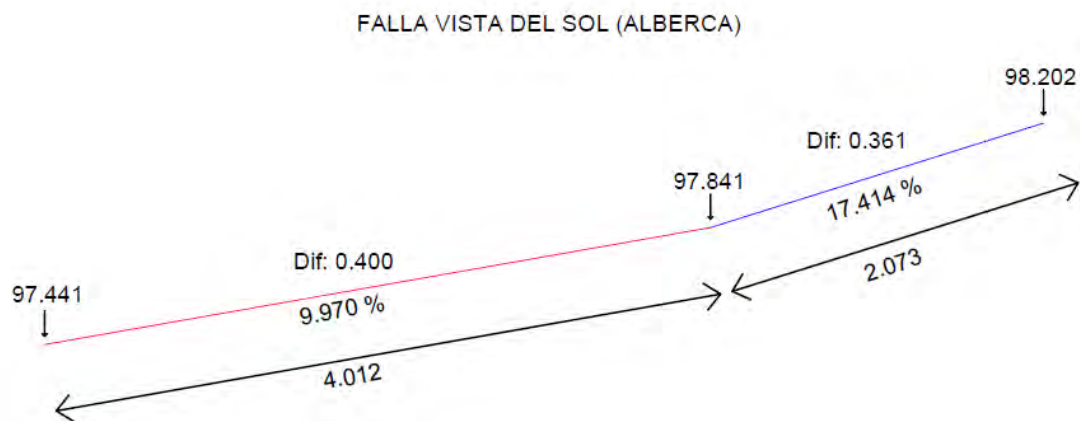


Figura 3.2 Análisis de la falla oriente ubicada en las instalaciones del IDEA. a) Pendientes y niveles falla oriente (Redibujado de Trejo-Corona, (2021))

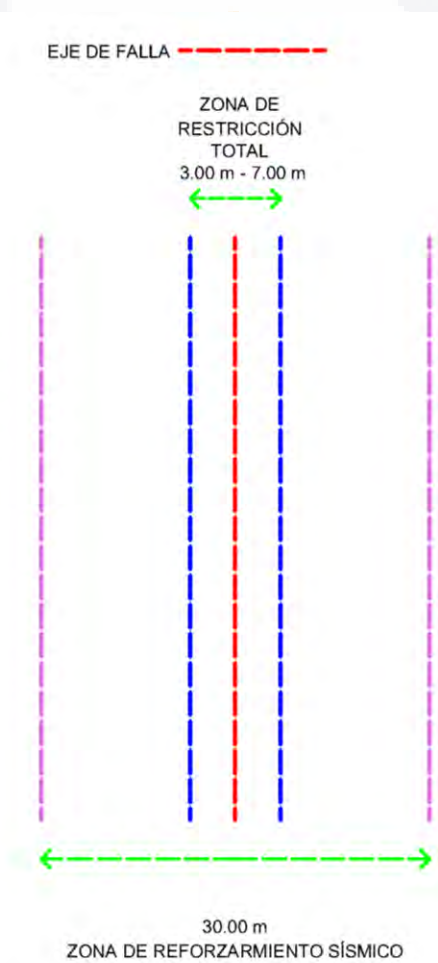


Figura 3.3 Propuesta de restricción. Redibujado de Trejo-Corona, (2021)

Trejo-Corona (2021) concluyó que “los daños de la falla en la alberca olímpica sobre el bloque oriente se presentan cuando la falla atraviesa un inmueble, lo cual provoca un peligro potencial, siendo el área de afectación menor al que se propone en las leyes municipales”. De acuerdo con los resultados del análisis que se efectuó, se propuso una zona de absoluta restricción y otra zona que se trata como zona de reforzamiento sísmico, usando el reglamento de la ciudad de México, aunque el área de restricción es variable por lo que es importante establecerlos mediante métodos apropiados para que con ello exista menor desaprovechamiento de espacios en el área urbana.

Conjuntamente es importante realizar un estudio en el subsuelo del área de estudio, para ello Luna-Villavicencio et al., (2020) determinaron el ancho de influencia generado por fallas superficiales activas con base en una caracterización geofísica apoyada de perfiles sísmicos, para ello, se detectaron cambios de velocidad de onda sísmica mostrando anomalías en el subsuelo. Generalmente, una reducción en la velocidad de la onda se produce debido a la variación de densidad por afectaciones de discontinuidades, llamada densidad secundaria, en la cual, se genera una zona con material mecánicamente perturbado produciendo daños en infraestructura causada por hundimientos diferenciales.

Según el trabajo de Luna-Villavicencio y colaboradores, el ancho de influencia de una falla se divide en una zona activa siendo el sitio donde se presentan las velocidades de onda más bajas, existiendo deformaciones importantes del suelo debido al aumento del escarpe de la falla o en general debido a los daños visibles en el suelo y en estructuras constructivas. Por su parte la zona de transición aun comprende velocidades bajas pudiendo existir problemas de movimiento ocasionados por la discontinuidad superficial con el avance del tiempo, dicha zona es tratada como una distancia de seguridad. Finalmente la zona sin falla comprende la zona donde las velocidades de onda aumentan lo que indica que no existe suelo perturbado y tampoco riesgo para construir. En la figura 3.4 se muestra la propuesta de estos autores. El estudio de la formación de discontinuidades y sus afectaciones es de gran importancia por lo que es necesario determinar la susceptibilidad y la zona activa de las fallas con metodologías apropiadas.

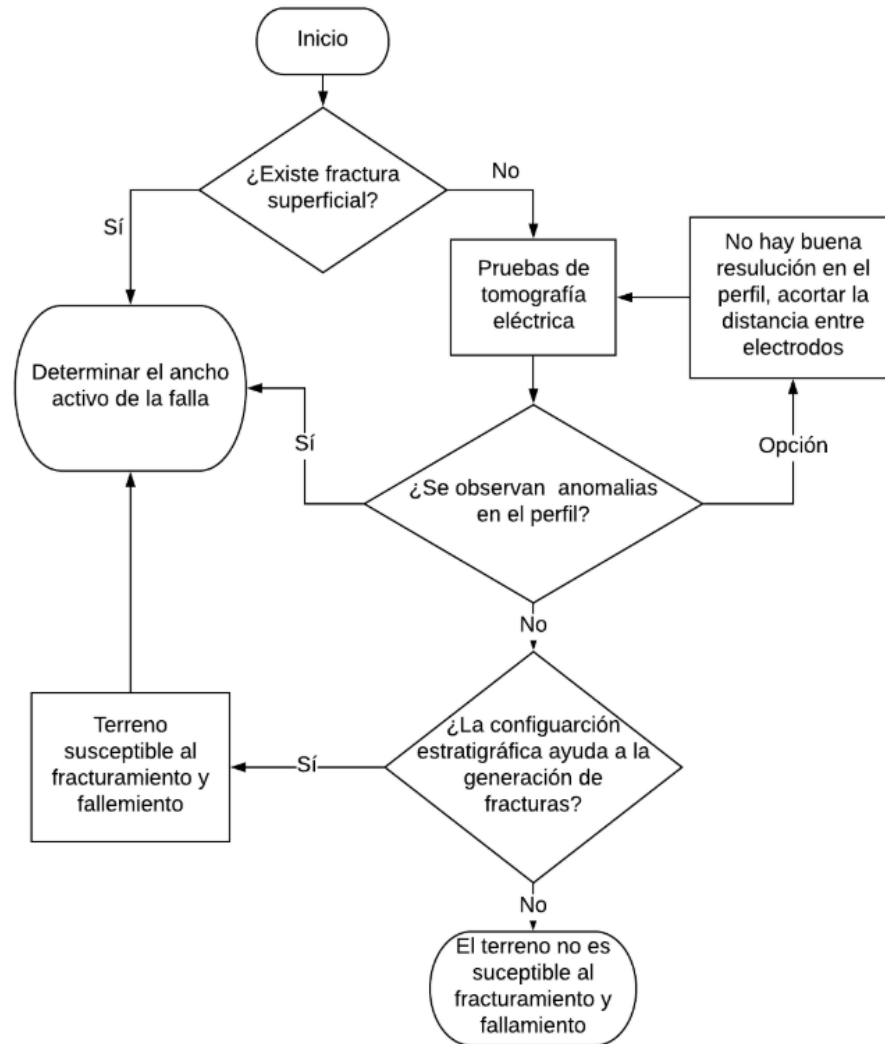


Figura 3.4 determinación de la susceptibilidad al fracturamiento y la zona activa de la falla (Luna-Villavicencio, 2018).

3.3. Estudios previos

El área de estudio se localiza en la zona oriente de la ciudad sobre la Av. Adolfo López Mateos en las inmediaciones del IDEA, donde existen afectaciones por la falla oriente, por lo que en esta área se realizan constantemente trabajos de reparación por parte de la Secretaría de Gestión Urbanística y Ordenamiento territorial (SEGUOT). A continuación se muestran los resultados de un estudio previo (pero muy reciente) en la zona, realizado por Aguilar-Valdéz (2023).

Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes

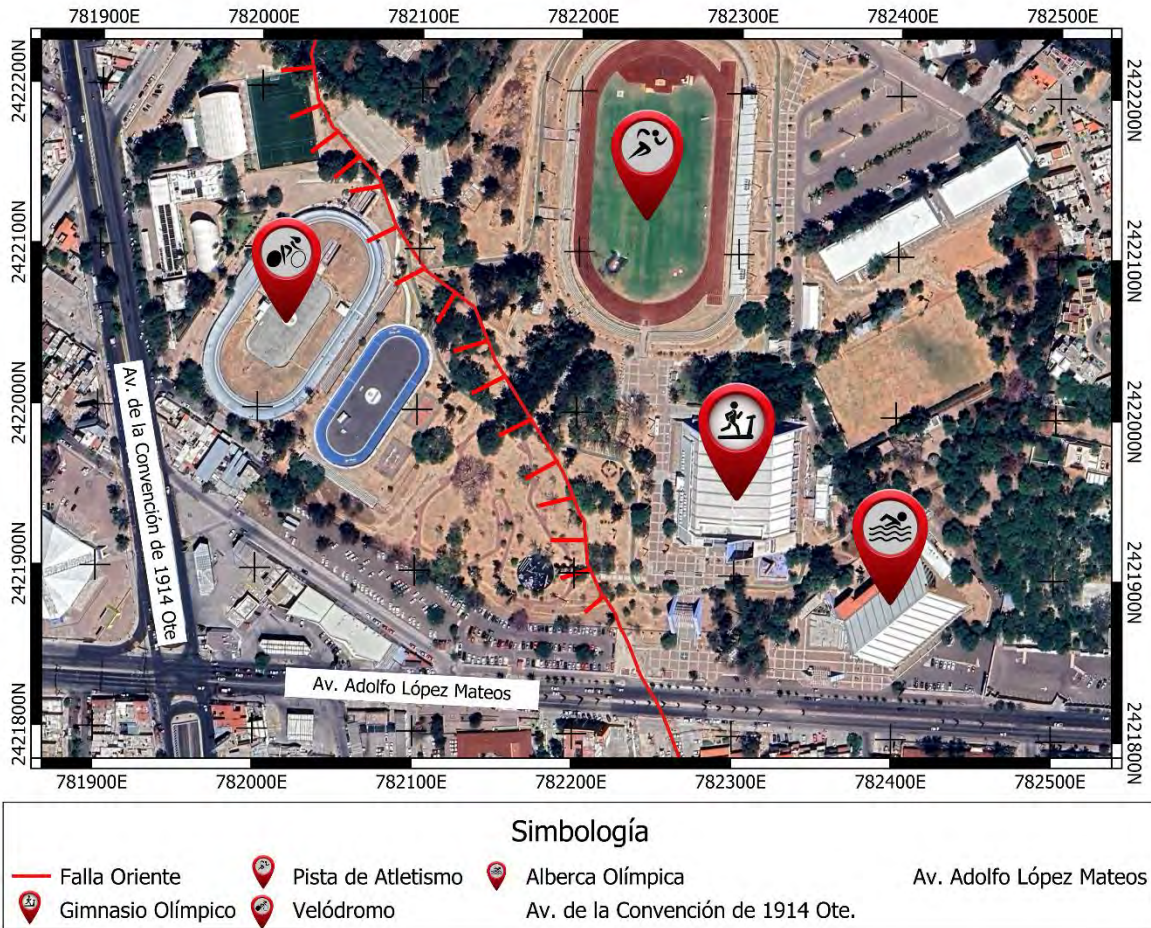


Figura 3.5. Zona de estudio – Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes.

3.3.1. Tomografía Eléctrica Resistiva

La implementación de la técnica de tomografía eléctrica se ejecutó por medio de una línea de tendido geoelectrico para poder determinar el área de afectación que genera la falla orientes en los límites de la Av. Adolfo López Mateos, esto consistió en un arreglo dipolar dipolo-dipolo, con un arreglo de 3 metros abarcando una longitud de estudio de 123 metros.

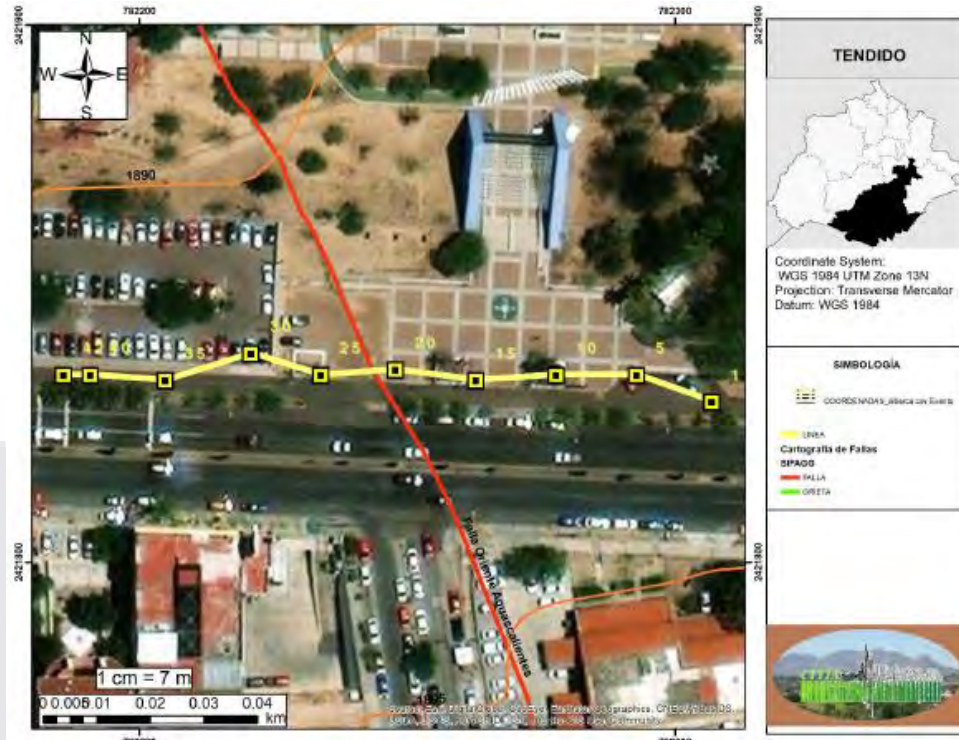


Figura 3.6. Ubicación de la zona de estudio y tendido del sondeo geo eléctrico (Aguilar-Valdez, 2023)

Los resultados obtenidos se representan en el perfil electro estratigráfico de la figura 3.6

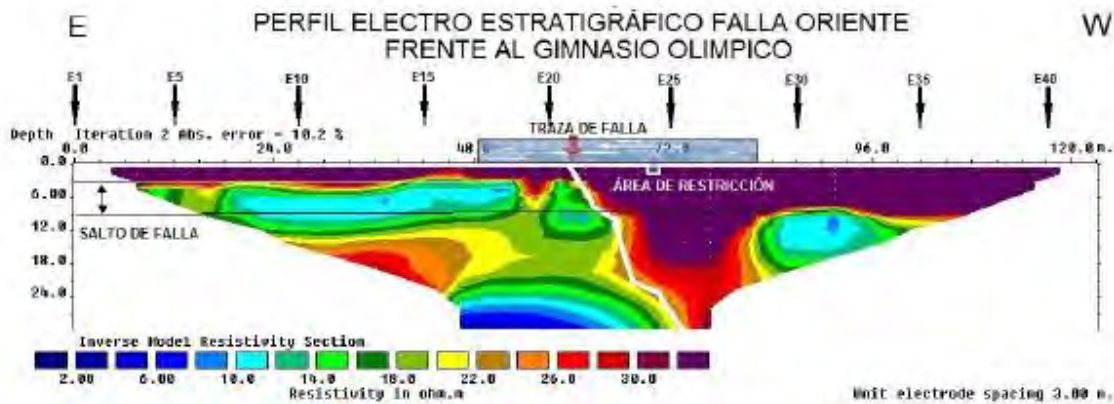


Figura 3.7. Modelo electro estratigráfico del sondeo en la Av. Adolfo López Mateos (Aguilar Valdez, 2023)

A partir de ese estudio realizado, Aguilar-Valdez (2023) propone una franja de restricción que abarca 10 metros en la zona del bloque de piso de la falla y de 20 metros del lado del bloque de techo de la falla, en la figura 2.5 se muestra en color rojo intenso la anomalía geoelectrica asociada a la falla.

3.3.2. Zanja de inspección

La zanja realizada fue en la zona del bloque de techo, esto debido a los procesos constructivos destinados a la reparación de la Av. Adolfo López Mateos, La profundidad de análisis fue de 3.3 metros, con ello se realizó un levantamiento fotográfico. A partir de los resultados de ese estudio previo, se determinó que para establecer la zona de afectación de la falla, la zanja realizada no fue suficiente tanto en su longitud como en la profundidad SEGUOT (2023).

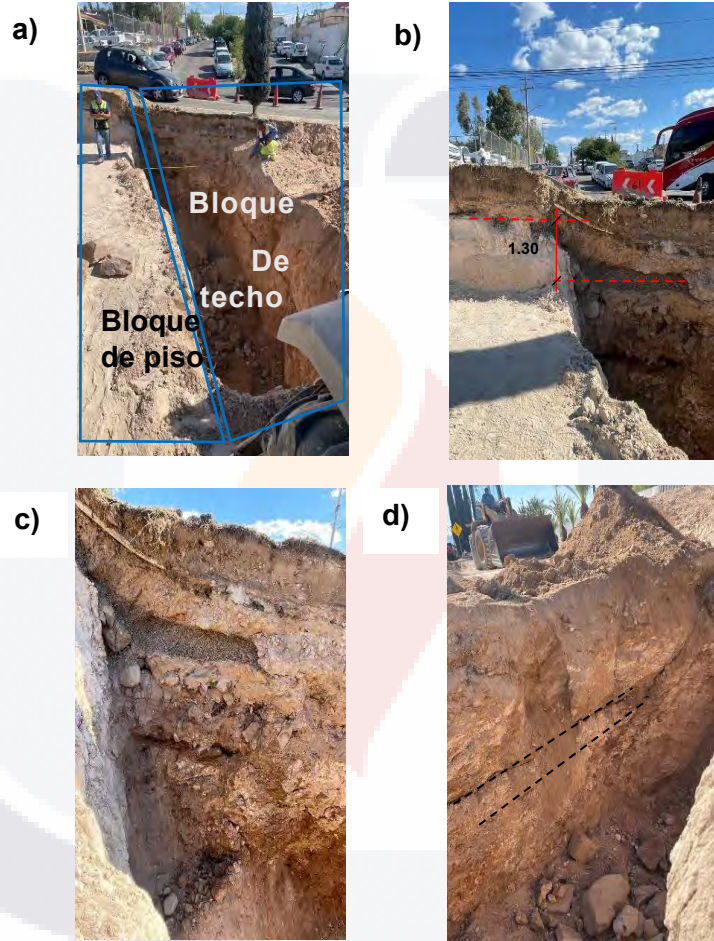


Figura 3.8. Inspección fotográfica a) Ubicación de bloque de techo y de piso b) Avance del movimiento de la falla oriente c) pared lado sur d) fisuras producidas por la actividad de la falla (Figuras del autor).

3.3.3. Normatividad del ancho de influencia en Aguascalientes.

La normatividad de construcción aplicable en cuestión a la potencial afectación por fallas o discontinuidades superficiales tiene como objetivo proporcionar seguridad y una buena calidad de vida a la población urbana.

La SEGGOB (2018) menciona en el código municipal de Aguascalientes la aplicación de medidas para salvaguardar la integridad de la población, con respecto a la existencia de fallas geológicas, grietas y fisuras, por ello se dividen diversos tipos de zonas dependiendo el riesgo que se afronte.

➤ Zona de riesgo alto

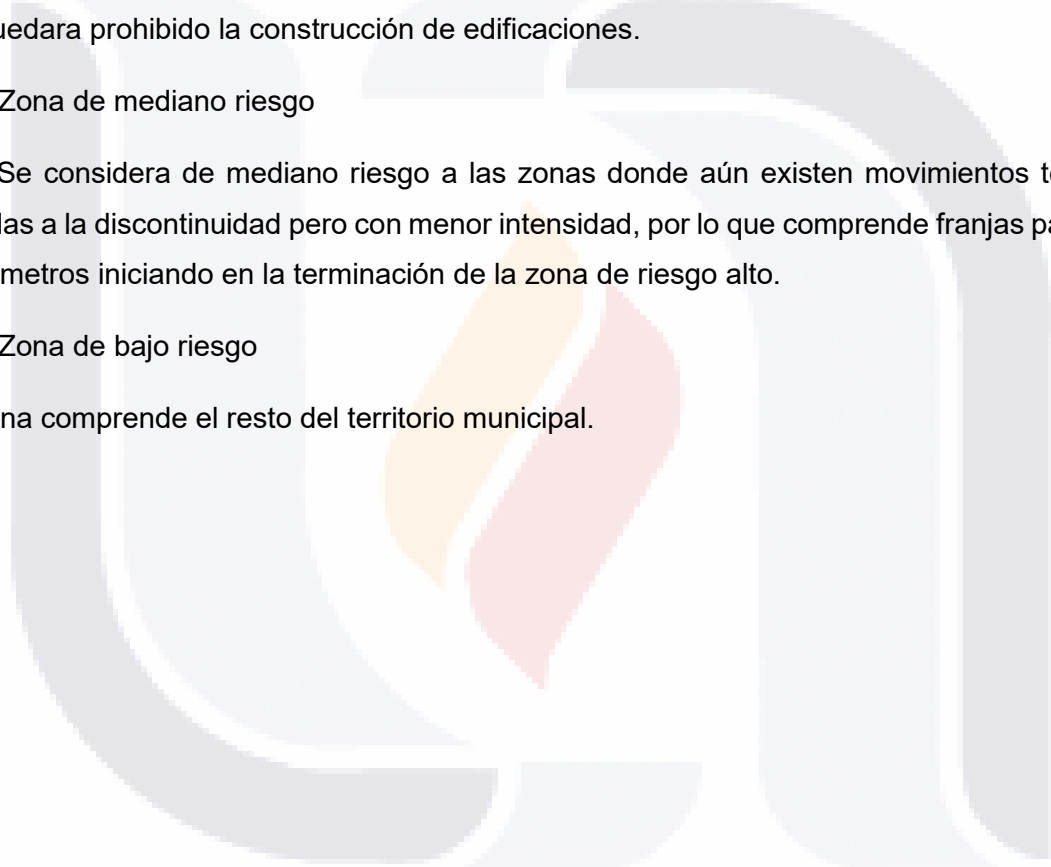
Se considera de alto riesgo a una franja de 5 metros de la discontinuidad o el señalado por el Ayuntamiento, esto debido a que los movimientos y asentamientos diferenciales provocados por dicho fenómeno que implica un riesgo enorme para el desarrollo urbano, en esta zona quedara prohibido la construcción de edificaciones.

➤ Zona de mediano riesgo

Se considera de mediano riesgo a las zonas donde aún existen movimientos telúricos asociadas a la discontinuidad pero con menor intensidad, por lo que comprende franjas paralelas de 200 metros iniciando en la terminación de la zona de riesgo alto.

➤ Zona de bajo riesgo

Esta zona comprende el resto del territorio municipal.



4. Metodología

El presente capítulo aborda los procedimientos y los métodos que se utilizaron para recabar la información necesaria para la investigación.

En grandes rasgos la metodología consistió en establecer la zona de influencia de la falla oriente en su tramo dentro del IDEA, para ello se utilizó una caracterización geofísica con ayuda del método de refracción sísmica mediante el cual se detectó fracturamiento y material perturbado, a la vez se llevó a cabo un mapeo de fisuras y grietas a las construcciones aledañas para cotejar los daños tangibles a dichas estructuras.

El seguimiento de esta investigación se llevó a cabo en cuatro etapas, las cuales se expondrán a continuación.

4.1. Etapa 1: Investigación bibliográfica

Al inicio de la investigación se realizó un análisis de trabajos previos, tanto a nivel local como nacional y mundial, esto con el fin de tener un panorama más amplio de las etapas y métodos abordados en otras investigaciones, y con ello poder determinar el procedimiento óptimo para el proyecto de investigación.

Se procedió a la investigación de la fundamentación teórica, donde se definieron detalladamente los puntos claves del proyecto de investigación.

4.2. Mapeo de afectaciones en inmuebles dañados por la falla geológica

La identificación de las edificaciones afectadas más cercanas a la falla de estudio se realizó mediante visitas de campo y con ayuda del software Qgis, con el fin de precisar la ubicación destacando una edificación (señalada en la figura 4.1), siendo un velódromo (representado con un ovoide) ubicado a 20 metros de la falla.

La visita y observación detallada en la edificación de la zona de estudio permitió identificar en gran medida las afectaciones de ésta debido a la actividad de la falla, posteriormente, se realizó un análisis de las afectaciones en función de la distancia a la que se encuentran, por ello fue necesario identificar las zonas con mayor concentración de grietas y fisuras en las edificaciones.

Adicionalmente se realizaron vuelos fotogramétricos con el fin de obtener modelos 3D para conseguir una vista general de los inmuebles y con ello, se efectuó un mapeo general de las afectaciones en el inmueble, con lo cual se pudo realizar un mapa de densidad de fracturas y grietas, asumiendo que todas ellas están relacionadas con la actividad de la falla.

Edificación contigua a la falla

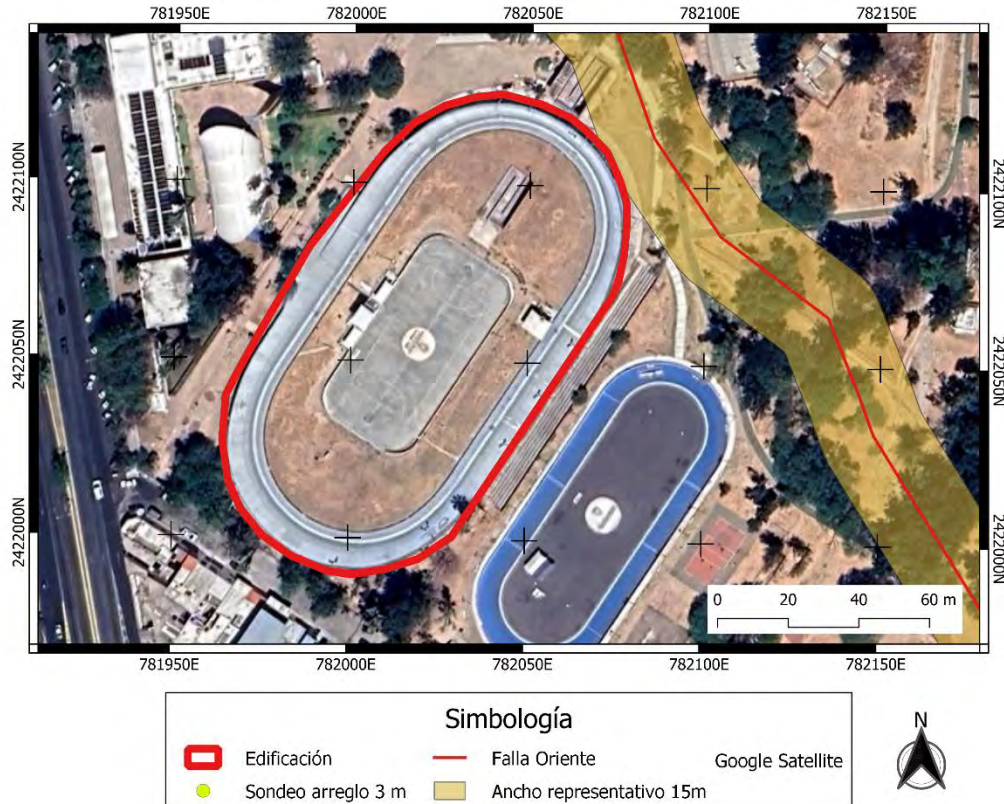


Figura 4.1 Edificaciones cercanas a la falla orientes en las instalaciones del IDEA. En línea gruesa roja se indica la edificación (velódromo) sobre la que se concentró el estudio de daños.

4.3. Etapa 3: Aplicación de sondeos sísmicos

Los sondeos sísmicos fueron realizados dentro de las instalaciones del instituto del deporte del estado de Aguascalientes, sobre la falla oriente de la ciudad. Se utilizaron un total de 2 arreglos para dichos sondeos, esto con el fin de lograr mayor alcance en el estudio, aunque se contaba con limitaciones de espacio, por lo que primeramente se realizaron tres sondeos con un arreglo de 1.5 metros entre cada geófono logrando un ancho de estudio de 34.5 metros. Así, con los datos obtenidos se valoraron las zonas donde era factible extender los arreglos, siempre y cuando no existieran obstáculos que lo impidiera. Finalmente, dadas las condiciones de espacio de la zona se realizaron solo dos sondeos con un arreglo de 3 metros entre cada geófono

logrando un ancho de estudio de 69 m. La distribución de los sondeos mencionados anteriormente se observa en la figura 4.2.

Para llevar a cabo los sondeos de refracción sísmica se utilizó un sismómetro marca “Geode” modelo “Ultra-light”, siguiendo el proceso expuesto a continuación:

1. Se colocaron los geófonos en el suelo (24 geófonos de 4.5 Hz.), distribuidos equidistantemente sobre la línea de estudio.
2. Se ubicaron los puntos donde se generaron las fuentes sísmicas artificiales utilizando un mazo de 10 libras, el cual se percute sobre una placa de acero colocada en contacto directo con el suelo (5 disparos distribuidos equidistantemente por cada sondeo).
3. La fuente sísmica artificial propaga ondas en el subsuelo pudiendo ser éstas refractadas, y posteriormente detectadas por los geófonos colocados en la superficie, dichos geófonos miden el tiempo de llegada de las ondas de compresión P (Tiempo de arribo).

Para el procesamiento de datos se obtuvieron las dromocronas (Gráfico de tiempo de arribo vs separación de geófonos) mediante la cuales se identificaron las variaciones de la onda sísmica con respecto al tiempo de viaje de éstas, distinguiendo las zonas donde la pendiente de la gráfica (Tiempo vs Distancia) aumenta, existiendo en ese punto la presencia de material perturbado, y con ayuda de este análisis se construyeron las gráficas de velocidad vs distancia, utilizando la fórmula distancia entre tiempo, siendo la distancia la separación de geófonos según el arreglo que se propuso y el tiempo la diferencia entre los tiempos de arribo para cada geófono, esta gráfica representó de manera más clara la zona del estudio donde existe baja velocidad, es decir; la zona donde la falla influye en mayor medida en suelo, interpretándola como la zona de influencia de la falla.

4.4. Etapa 4: Análisis de la información

Para el manejo de la información proporcionada por el método de refracción sísmica se realizaron perfiles sísmicos donde se determinaron las anomalías existentes en el subsuelo con ayuda de la interpretación de la velocidad de ondas generadas y las discontinuidades que se pudieron distinguir, con todo ello se delimitó el ancho de influencia asociado a la falla geológica.

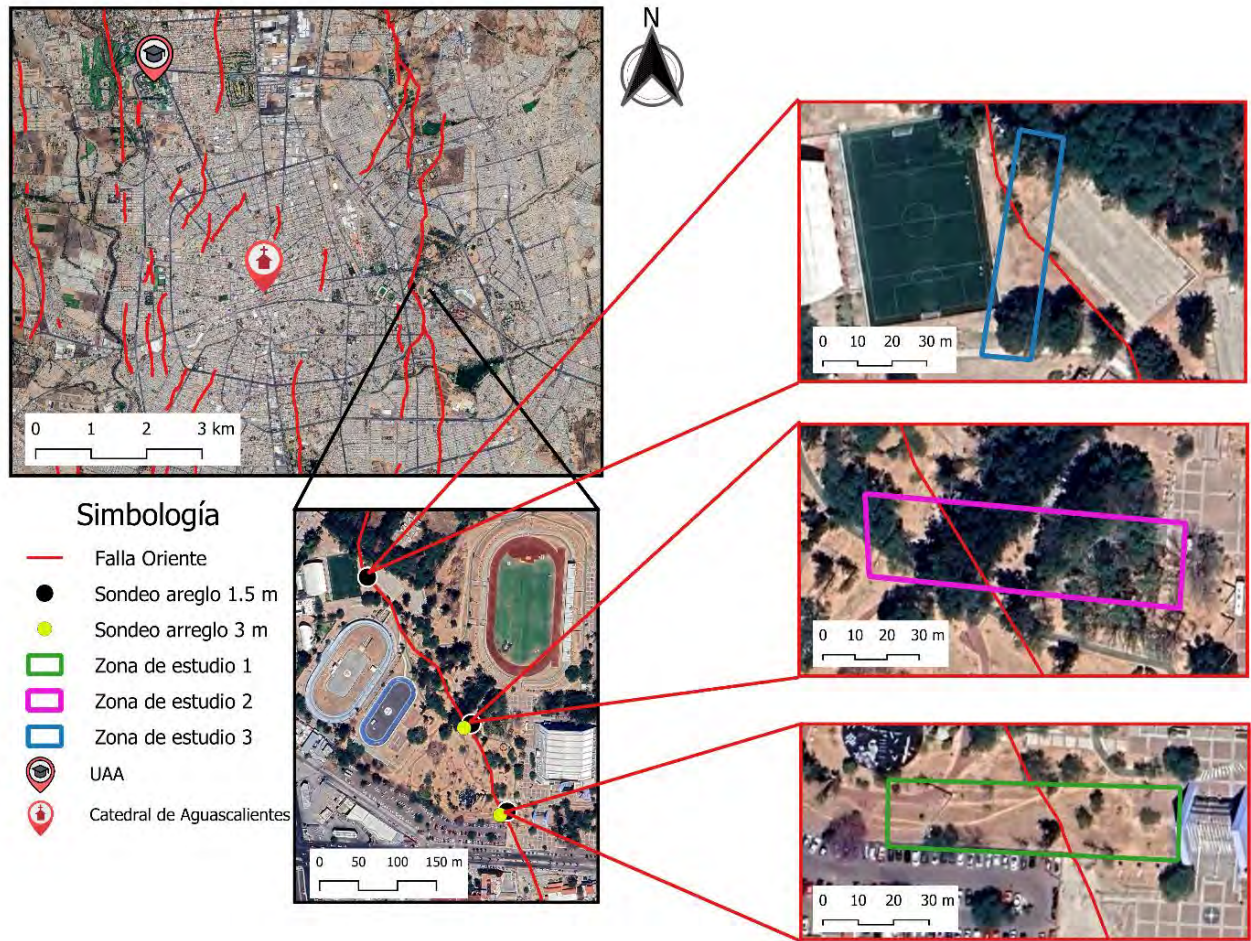


Figura 4.2 Sondeos de refracción sísmica en las instalaciones del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes.

Por su parte, al realizar el mapeo de afectaciones en las edificaciones aledañas se detectaron zonas con mayor densificación de grietas y fisuras, potencialmente producidas por la falla induciendo deterioro en dichas edificaciones.

Con el análisis de la información anterior, se realizó una correlación del ancho de influencia de la falla identificado por el método de refracción sísmica y las zonas de las construcciones en donde existe mayor densidad de grietas y fisuras, con base en el análisis realizado se está proponiendo un aumento de la zona de restricción para futuras construcciones, considerando un ancho de influencia óptimo para la zona estudiada en particular.

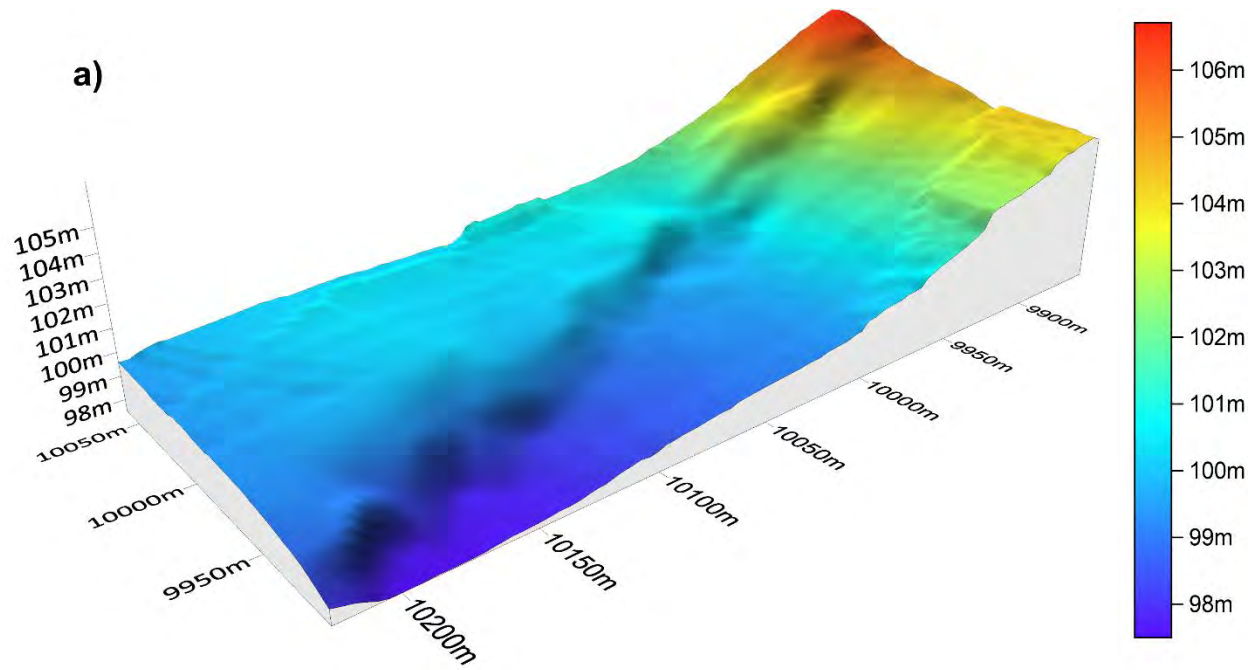
5. Resultados

En este capítulo se exponen los resultados del estudio realizado en las instalaciones del IDEA, en donde existen afectaciones debido a la denominada Falla Oriente. Dicho estudio fue distribuido en tres zonas, realizando un sondeo de refracción sísmica con arreglo de 1.5 m entre geófonos para cada zona de estudio, y un sondeo con un arreglo de 3 m entre geófonos en las zonas uno y dos, además de levantamiento topográfico y un mapeo de fisuras y grietas en las edificaciones colindantes a la falla estudiada.

5.1. Levantamiento topográfico

Dentro de las instalaciones del IDEA se realizó un levantamiento topográfico sobre la línea de la falla geológica, esto con el fin de obtener secciones topográficas en la zona de estudio para observar la diferencia de niveles. La figura 5.1 muestra los resultados de dicho levantamiento.

El levantamiento topográfico muestra claramente el escarpe que genera la falla y la diferencia de niveles entre los bloques, en las secciones topográficas mostradas en las figuras 5.1b, 5.1c y 5.1d siendo de las zonas de estudio 1, 2 y 3, respectivamente, se observa que la diferencia de niveles ronda entre 1 metro y 1.5 metros. Mientras que en las curvas de nivel de la figura 5.1e se observa una pequeña prominencia en la zona superior derecha, representada de igual forma en la figura 5.1a, dicha protuberancia se ubica a 70 metros de la discontinuidad y tiene un escarpe de 10 cm.



Perfiles correspondientes a las zonas de estudio 1, 2 y 3, respectivamente

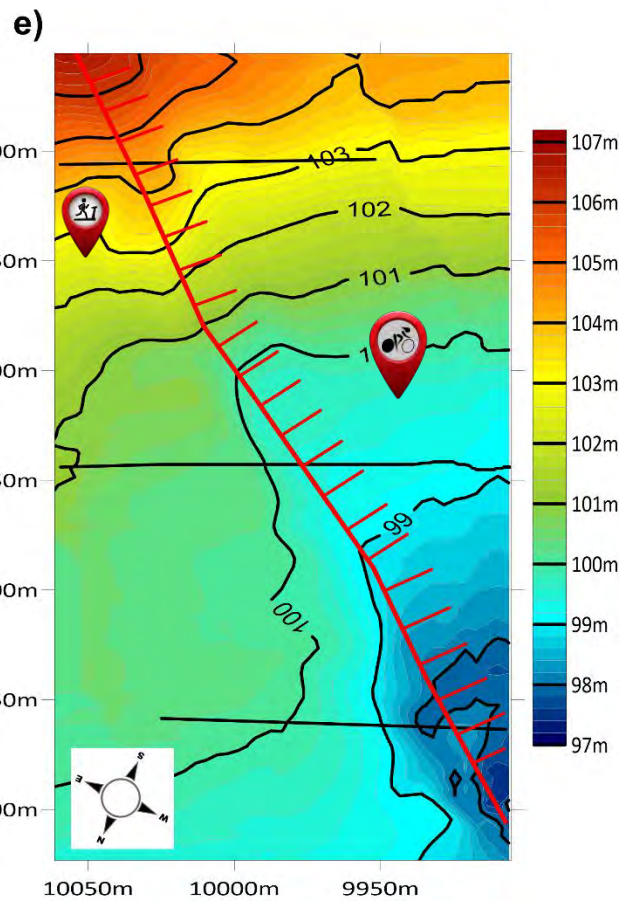
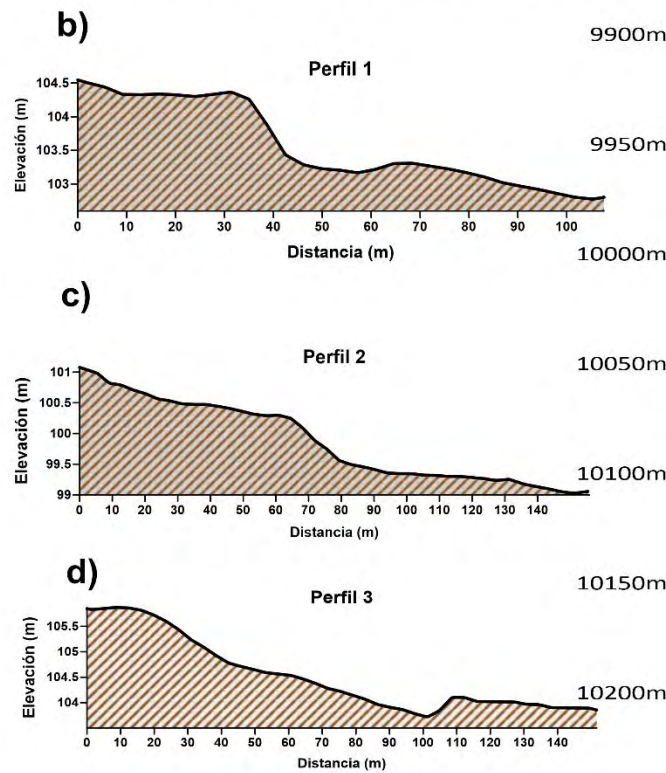


Figura 5.1. Levantamiento topográfico a) Modelo 3d de la zona de estudio b) Secciones topográficas de las tres zonas de estudio c) Curvas de nivel (sin escala).

5.2. Sondeos Geofísicos de refracción sísmica

En el presente capítulo se presentan los sondeos de refracción sísmica realizados en cada una de las zonas de estudio, exhibiendo el procesamiento de los datos mediante dromocronas (gráfico de tiempo de arribo vs separación de geófonos) en las cuales el desplazamiento de la onda sísmica se considera normal al disminuir las pendientes y anómala cuando existe un aumento, de acuerdo con el método de refracción sísmica, es por ello que se optó a la elaboración de tablas de pendiente entre geófonos y facilitar la determinación de dichas zonas (Anexos), y gráficos de velocidad ubicando las zonas de velocidades menores siendo en este el sitio de mayores anomalías.

5.2.1. Zona Uno

La zona de estudio uno se localiza dentro de las instalaciones del IDEA, en el municipio de Aguascalientes, Ags. sobre las coordenadas $21^{\circ}52'42.21''N$ $102^{\circ}16'08.3''W$ (Figura 5.2). En esta zona, la falla se evidencia debido al escarpe que ésta genera así como al daño causado en la carpeta asfáltica de la Av. Adolfo López Mateos (Figura 5.3). Esta falla muestra su bloque de techo en el lado poniente, mientras que el procesamiento de los datos obtenidos por la prueba de refracción sísmica se muestra en las figuras 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.

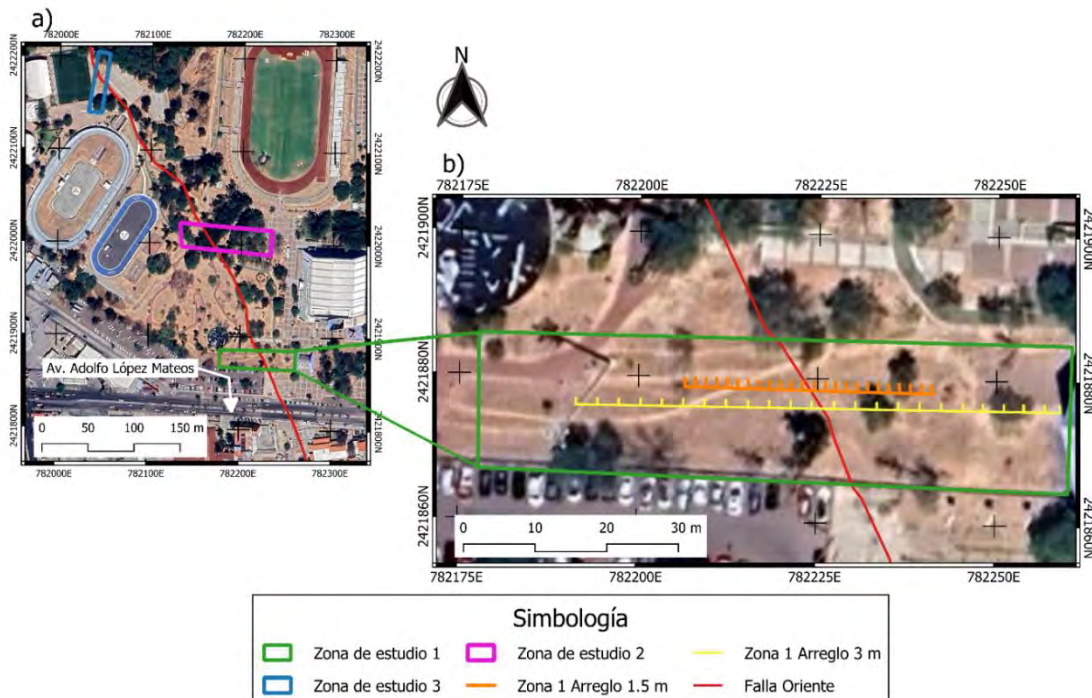


Figura 5.2. a) Ubicación de los tres sondeos de refracción sísmica en la zona de estudio b) Características de sondeo sur en la zona de estudio en sus dos diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros y 3 metros).

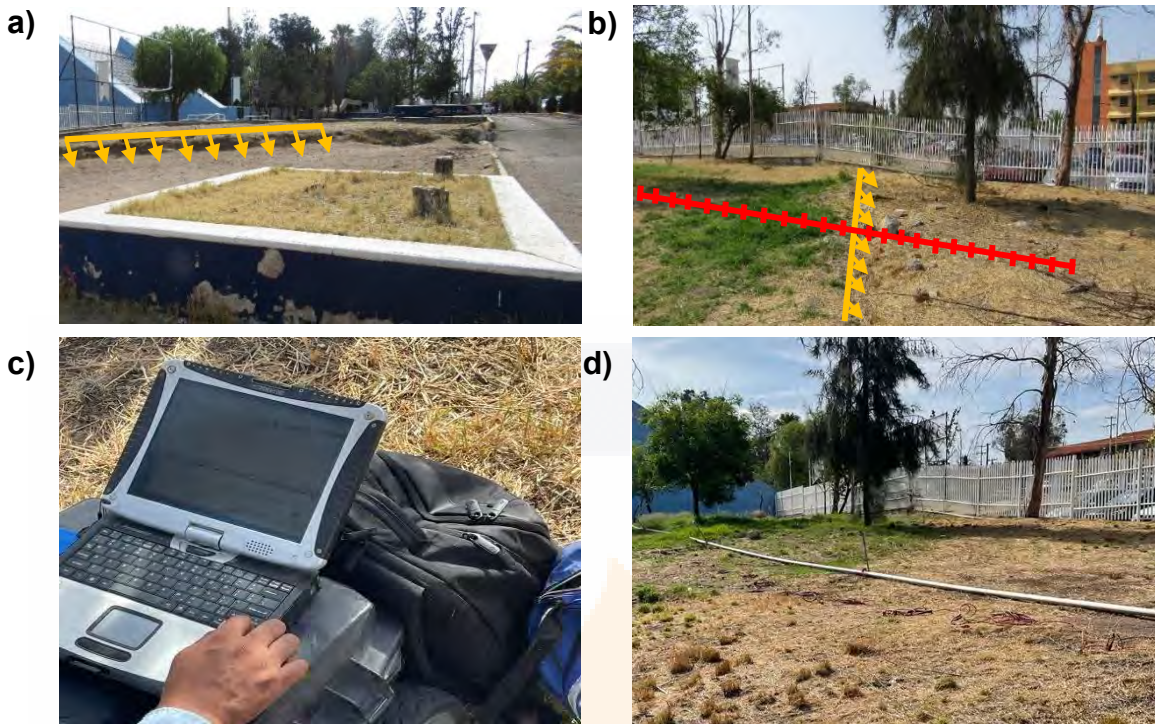


Figura 5.3. a) Escarpe de falla (Av. Adolfo López Mateos) b) Arreglo de geófonos 1.5 metros c) Aplicación de método de refracción sísmica d) Arreglo de geófonos

Las figuras 5.4 y 5.5 muestran las dromocronas obtenidas de los perfiles de refracción sísmica realizados con arreglos a cada 1.5 metros y 3 metros respectivamente, posicionando la falla al centro de cada sondeo (17.25 metros y 34.5 metros), destacando que la mayor parte de anomalías se localizan en el punto central del sondeo debido al viaje que realiza la onda a través de la falla, al mismo tiempo se observó la existencia de mayores anomalías en el bloque de techo de la falla.

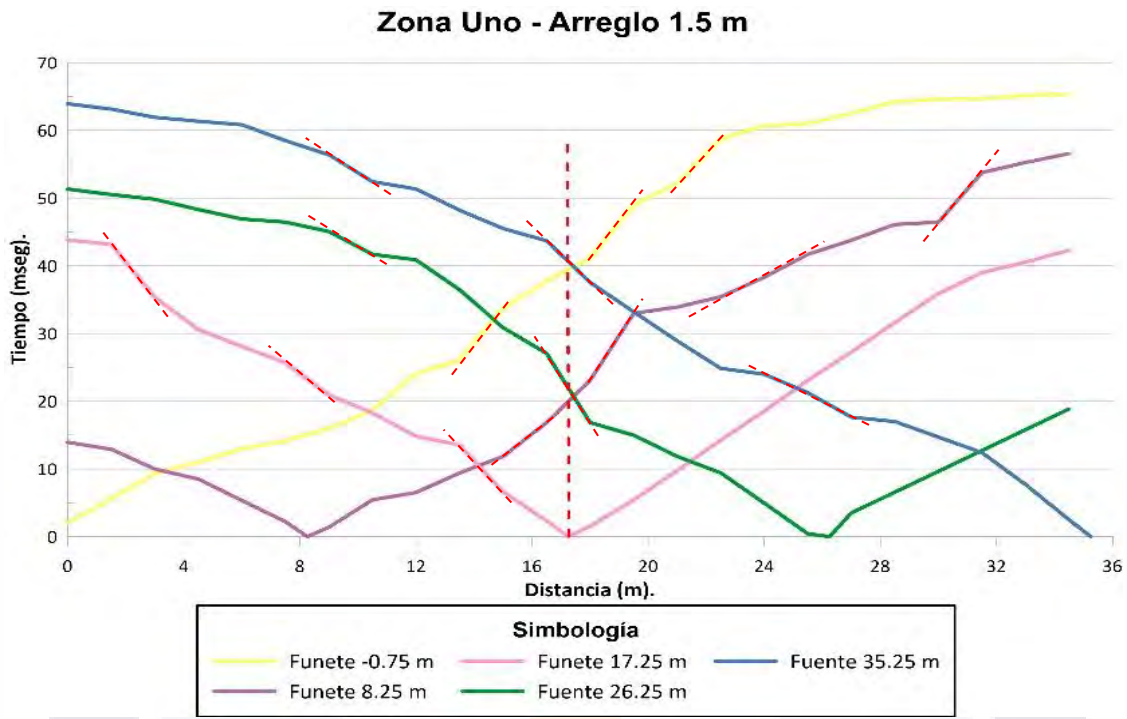


Figura 5.4 Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona uno de estudio con un arreglo de geófonos de 1.5 metros de separación, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales.

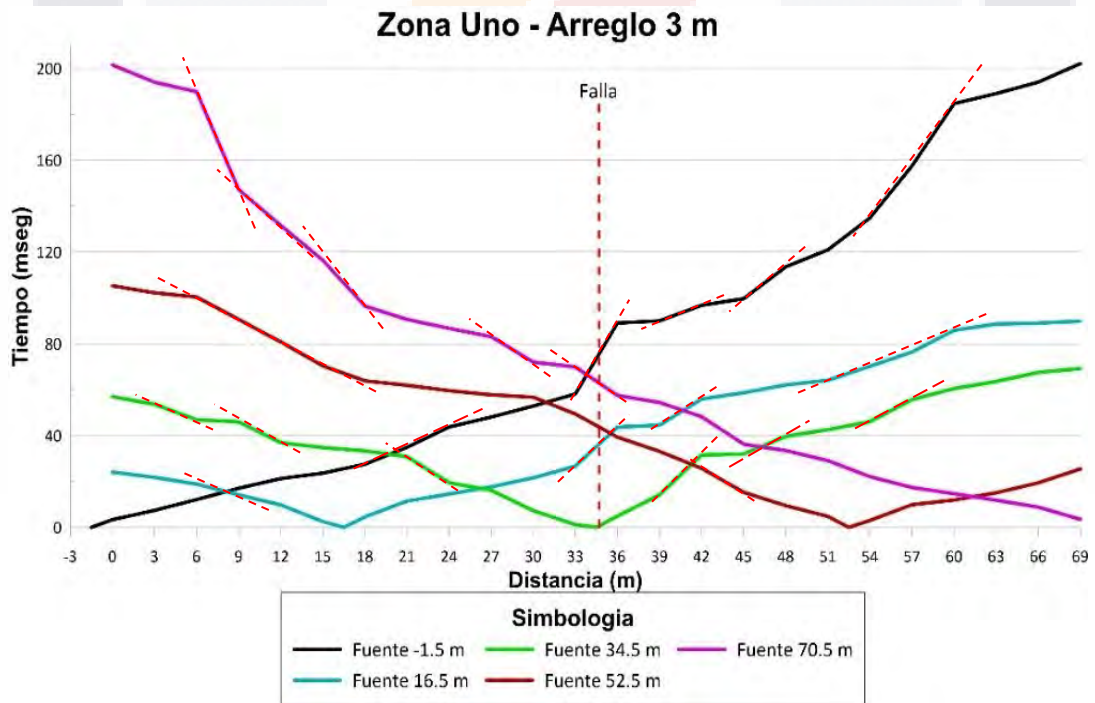


Figura 5.5 Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio uno con un arreglo de geófonos de 3 metros de separación, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales.

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran una recopilación de velocidades obtenidas por cada una de las fuentes sísmicas artificiales que se aplicaron en los sondeos realizados esto con el fin de valorar las zonas donde se presentan velocidades menores. En las imágenes se aprecia la zona con velocidades bajas ubicada prácticamente en el centro del sondeo, en donde también se ubica la falla geológica y el material perturbado aproximadamente 20 metros a los lados de la discontinuidad.

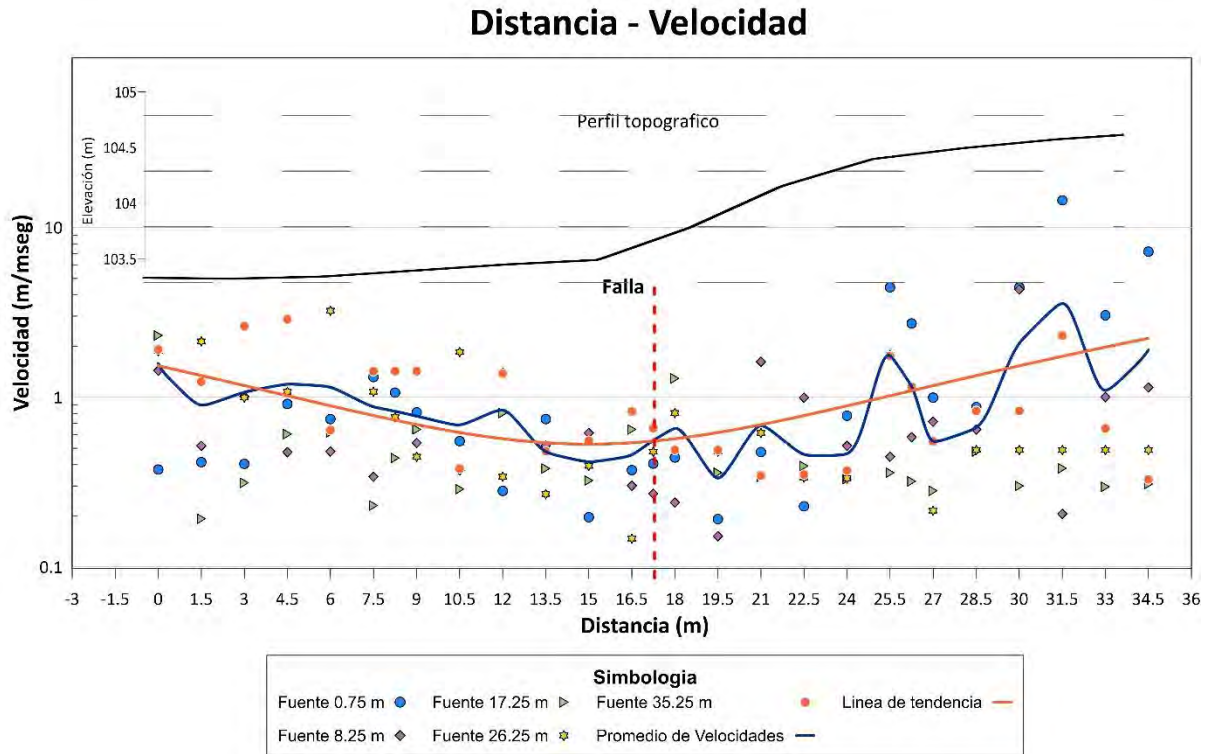


Figura 5.6. Diagrama de procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 1.5 metros y sobreponiendo perfiles topográficos del área de estudio. Los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la distancia a la fuente sísmica, los puntos azules unidos por una línea celeste representando el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia del promedio de velocidades.

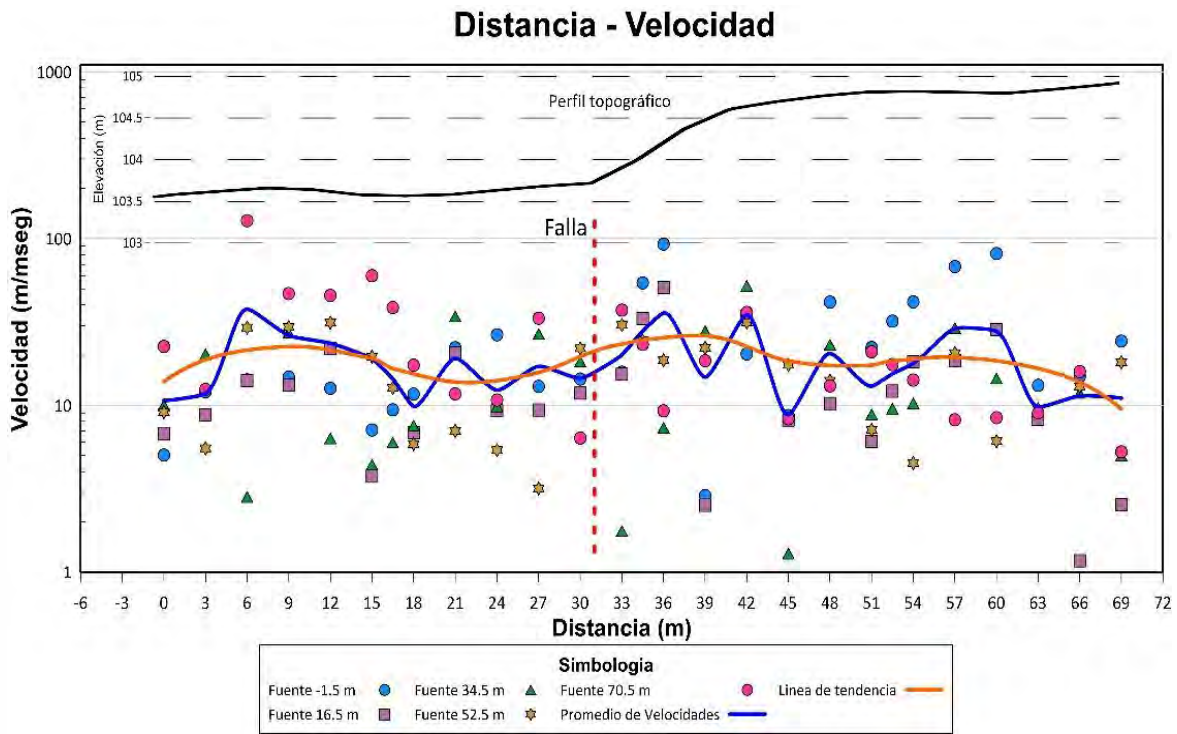


Figura 5.7. Procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 3 metros, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la distancia a la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia de los datos.

5.2.2. Zona dos

La zona de estudio dos se localiza sobre las coordenadas 21°52'46.39"N 102°16'9.26"O (Figura 5.8), realizando dos sondeos con diferentes arreglos entre geófonos, se utilizó un arreglo de 1.5 metros de separación ubicando la falla en la parte central y otro arreglo de 3 metros, aunque en éste se ubicó la falla a una distancia de 25.5 metros debido a obstáculos en el terreno (Figura 5.9d), En esta zona, la falla se observa en superficie como un escalonamiento y también se distingue por los daños en una pista para realizar ejercicios (Figura 5.9c). La falla muestra su bloque de techo hacia el lado poniente de la ciudad. El procesamiento de los datos obtenidos por la prueba de refracción sísmica se muestra en las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13, analizando los tiempos de llegada de la onda y su velocidad de traslado.

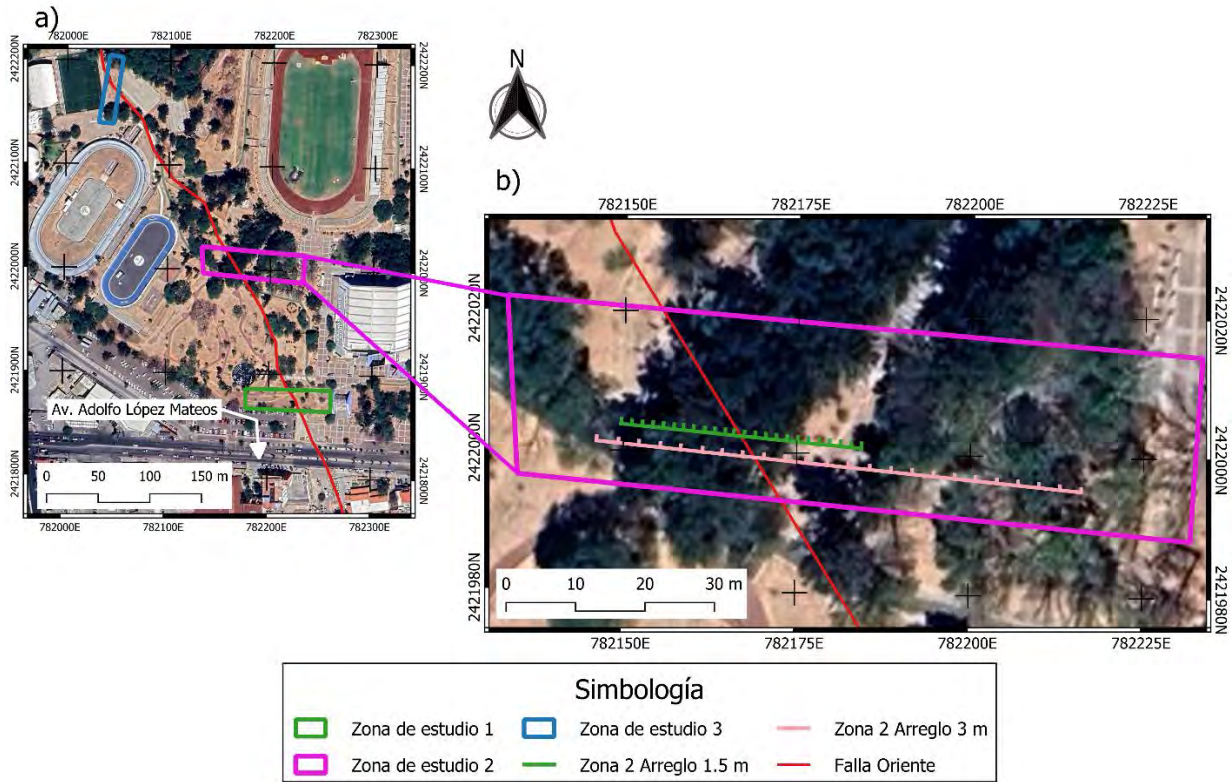


Figura 5.8. a) Ubicación de zonas de estudio mediante sondeos de refracción sísmica b) Zona de estudio dos representando diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros y 3 metros)

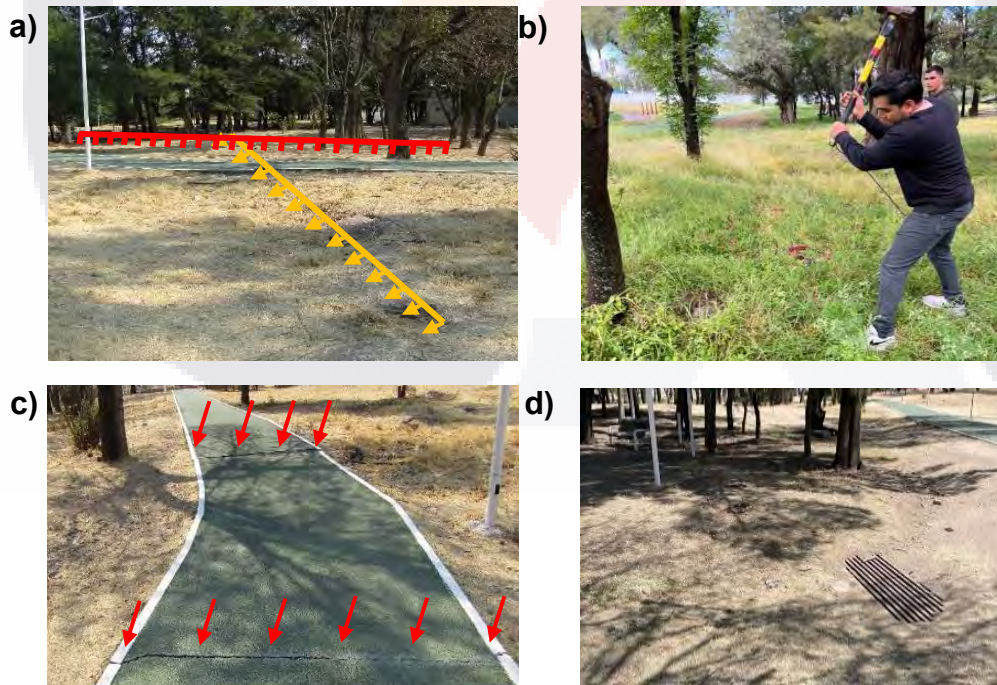


Figura 5.9. a) Escarpe de falla y orientación del acomodo de los geófonos b) Ensayo de refracción sísmica c) Afectaciones de la falla a infraestructura del IDEA (trota pista) d) Limite del ensayo de refracción sísmica en la zona de estudio dos.

En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran las dromocronas obtenidas del perfil de refracción sísmica realizado con arreglos de geófonos a cada 1.5 metros y 3 metros respectivamente. observando que la mayor parte de anomalías se localizan sobre la falla, esto se debe al viaje que realiza la onda por medio de la esta, al mismo tiempo observamos la existencia de mayores anomalías en el bloque de techo de la falla.

El sondeo uno representado en la figura 5.10 abarca un ancho de 34.5 metros, y en el cual se observaron alteraciones de la onda sísmica en toda la zona, por ello se realizó el sondeo dos representado en la figura 5.11 comprendiendo un ancho de 69 metros, observando que en puntos más alejados a la falla el paso de la onda sísmica se regulariza por lo que en estos puntos aun no existen alteraciones importantes a causa del movimiento de la falla.

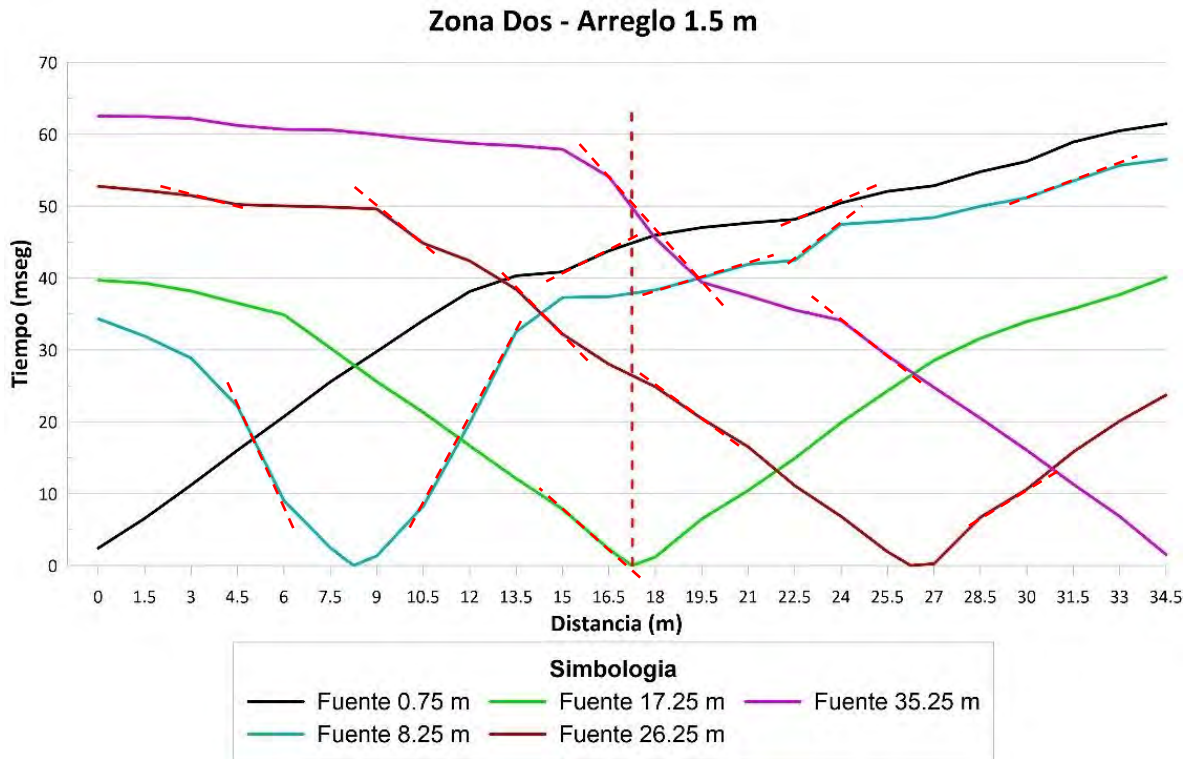


Figura 5.10. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio dos con un arreglo de geófonos de 1.5 metros, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales.

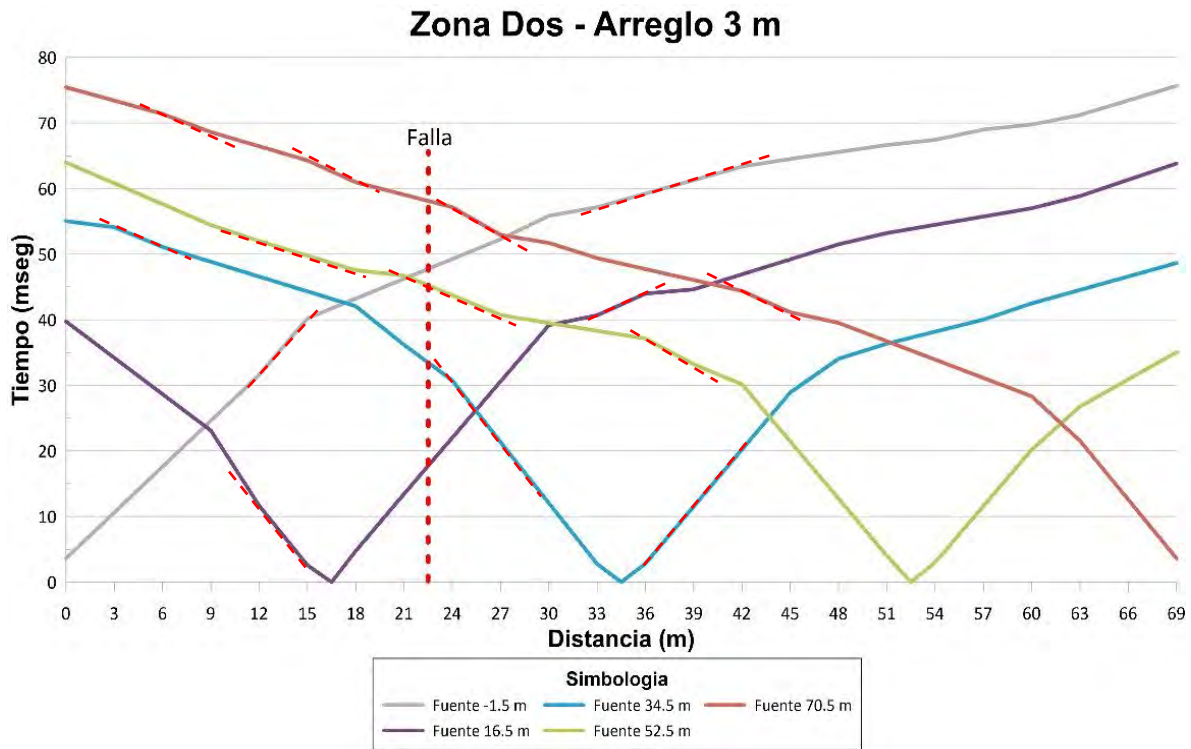


Figura 5.11. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio dos con un arreglo de geófonos de 3 metros, efectuando cinco fuentes sísmicas artificiales.

Las figuras 5.12 y 5.13 muestran una recopilación de velocidades obtenidas por cada una de las fuentes sísmicas artificiales que se aplicaron en los sondeos realizados, esto con el fin de valorar las zonas donde se presentan velocidades menores, en las imágenes se aprecia la ubicación de velocidades bajas en la zona derecha de las gráficas representado el bloque de techo de la falla geológica orientada al lado poniente de la ciudad. En la imagen 5.12 se observa que la falla cruza justamente en el centro del sondeo observando que a partir de los 16 metros las velocidades comienzan a descender. Finalmente en la imagen 5.13 se observa que a partir de los 20 metros existe un descenso importante de velocidades, resaltando que la falla se localiza a los 22.5 metros.

Velocidad - Distancia

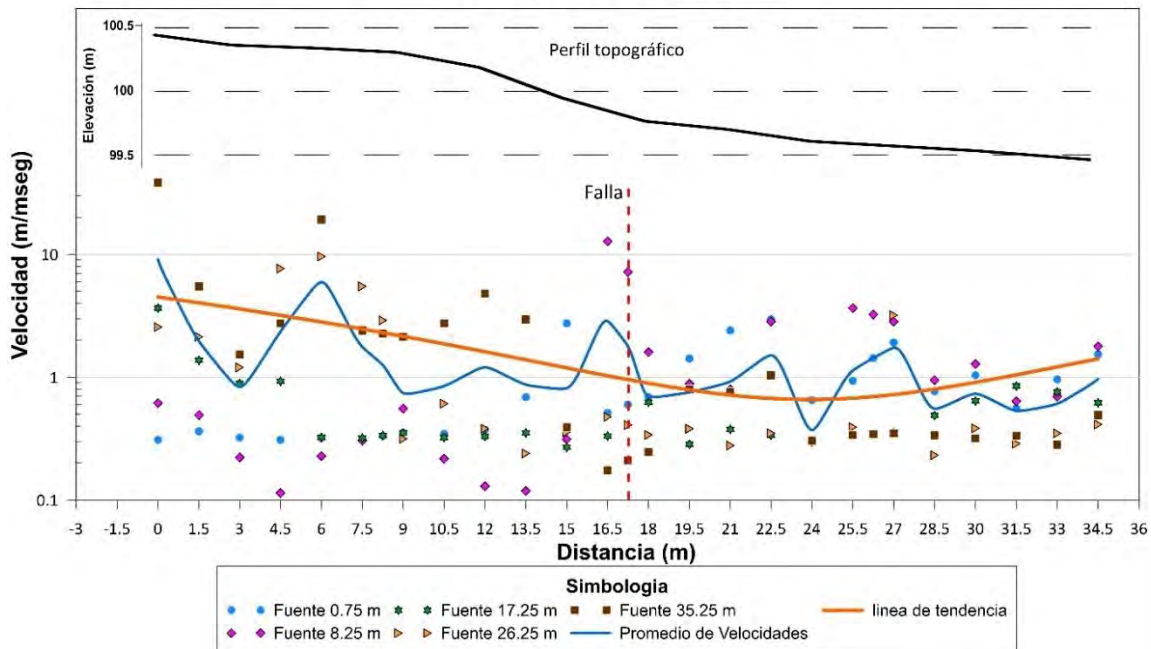


Figura 5.12. Procesamiento de datos sísmicos, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica. La línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia del promedio de velocidades.

Distancia - Velocidad

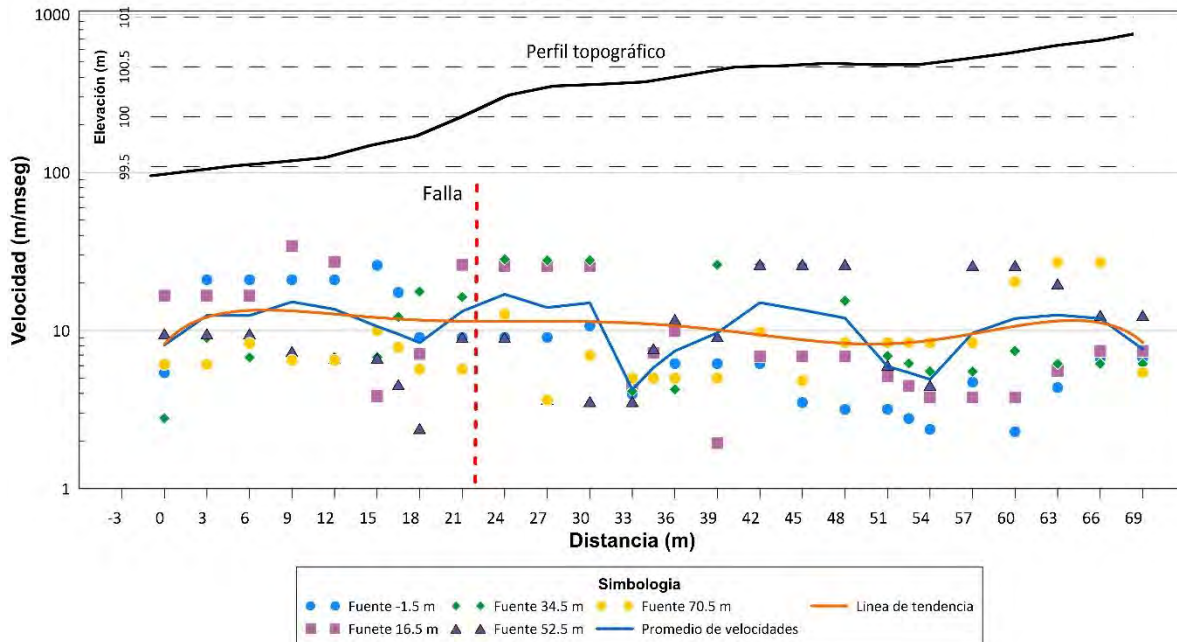


Figura 5.13. Procesamiento de datos sísmicos con arreglo a cada 3 metros, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja indica la tendencia de los datos.

5.2.3. Zona tres

La zona de estudio tres se localiza sobre las coordenadas 21°52'52.34"N 102°16'14.25"O (Figura 5.14), En esta zona la falla se observa como un escarpe y se distingue también debido a los daños en las canchas aledañas ubicadas a un lado del sondeo, además de que en unos tramos se observa como una grieta de abertura considerable (Figura 5.15b). El sondeo realizado en esta zona consistió en un arreglo de 1.5 metros entre geófonos, ubicando la falla geológica en la parte central de dicho sondeo y con cinco fuentes sísmicas distribuidas uniformemente.

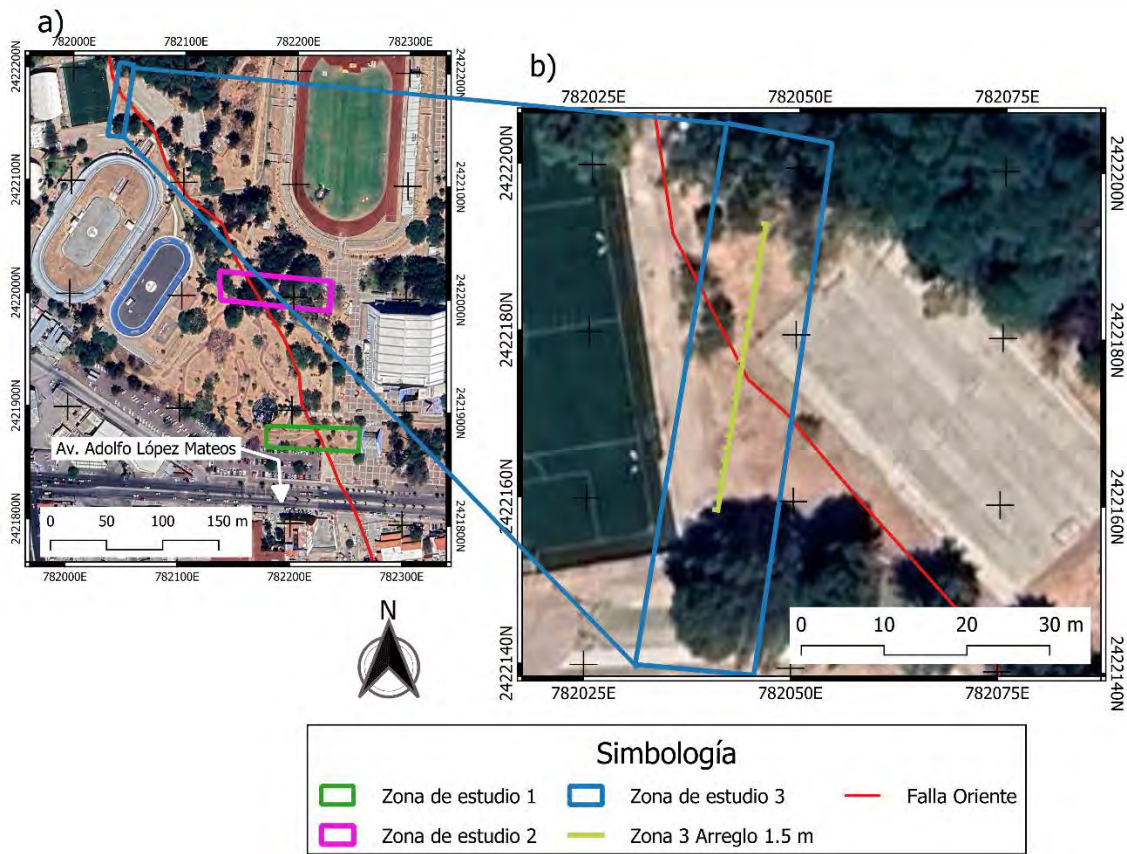


Figura 5.14. a) Ubicación de zonas de estudio mediante sondeos de refracción sísmica b) Zona de estudio tres mediante diferentes arreglos de geófonos (1.5 metros).

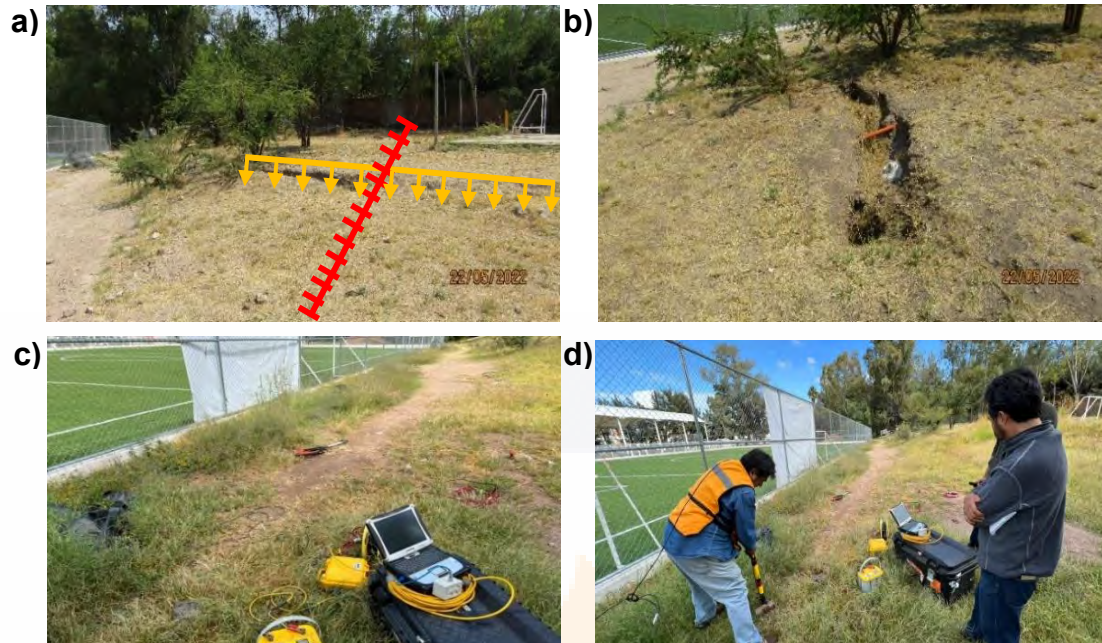


Figura 5.15. a) Escarpe de falla y orientación del acomodo de los geófonos b) Afectaciones de la falla c) Equipo utilizado para realizar sondeos de refracción sísmica d) Ensayo de refracción sísmica ensayo de refracción sísmica en la zona de estudio dos.

La figura 5.16 muestra las dromocronas obtenidas del perfil de refracción sísmica realizando mediante cinco fuentes sísmicas artificiales (localizadas a -0.75 metros, 8.25 metros, 17.25 metros, 26.25 metros y 35.25 metros), ubicando la falla a 17.25 metros ubicado, es decir, en el centro del sondeo, observando que la mayor parte de anomalías se localizan en el punto central del sondeo, esto se debe al traslado que realiza la onda a través de la zona de falla, al mismo tiempo se observa la existencia de mayores anomalías en el bloque de techo de la falla.

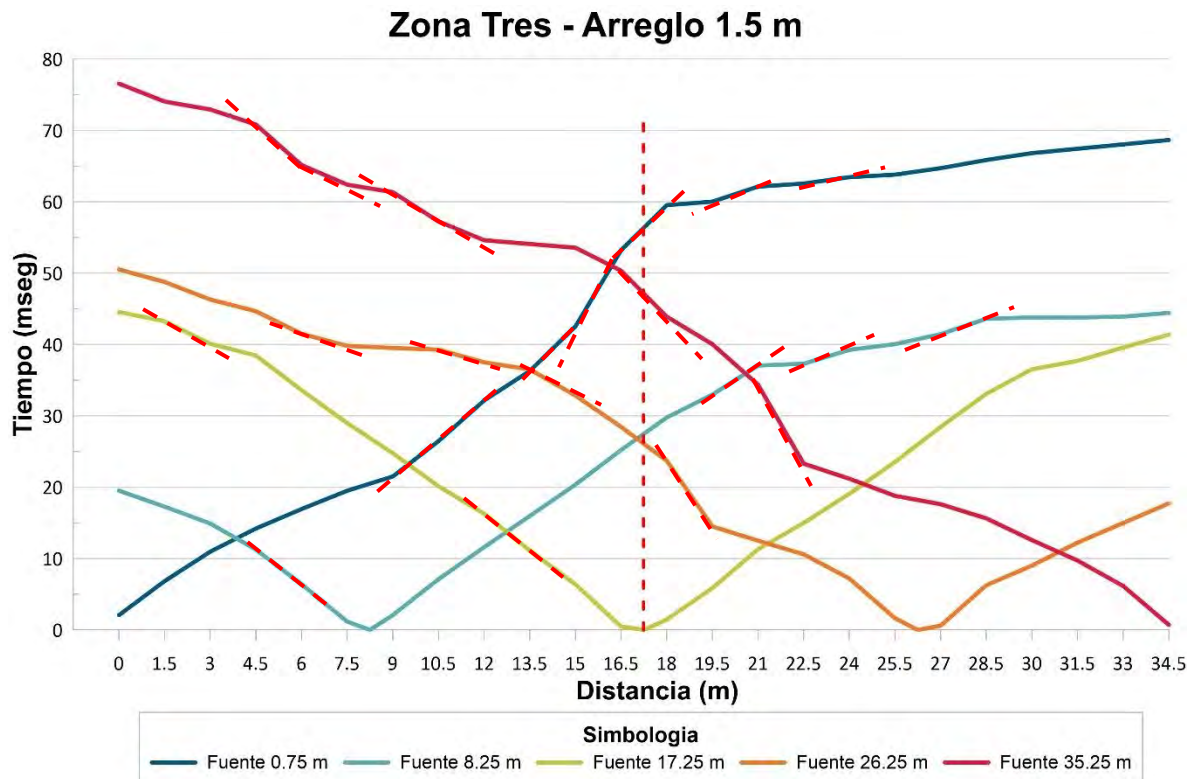


Figura 5.16. Dromocronas de datos sísmicos correspondiente a la zona de estudio tres con un arreglo de geófonos de 1.5 metros.

La figura 5.17 representa una recopilación de velocidades por cada fuente sísmica aplicada, esto con el fin de valorar las zonas donde existe mayor influencia por la falla, en la figura se observan velocidades menores en la zona izquierda representando el bloque de techo de la falla geológica orientada hacia el lado poniente de la ciudad.

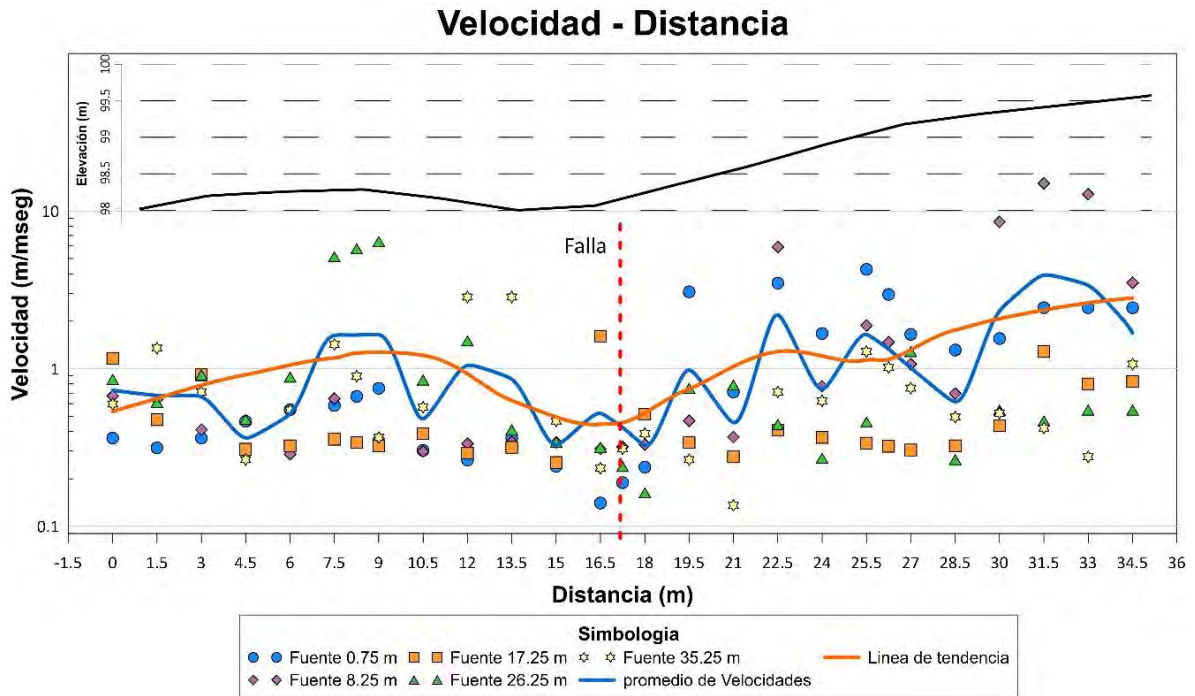


Figura 5.17. Procesamiento de datos sísmicos, los puntos dispersos indican la velocidad detectada por cada geófono dependiendo de la fuente sísmica, la línea azul representa el promedio de las velocidades y la línea naranja la tendencia de los datos.

5.3. Evaluación de daños en edificaciones

5.3.1. Velódromo

El IDEA, cuenta con un velódromo dentro de sus instalaciones, dicha estructura ha presentado un importante deterioro al paso del tiempo, existiendo daños en forma de grietas en muros, losas, pista, entre otros elementos. Dicha estructura se ubica a unos 20 metros de la falla oriente sobre el bloque de techo, por lo que ésta puede ser una de las causas principales de los daños observados.



Figura 5.18. Ubicación del velódromo y falla geológica. Los recuadros verdes en el velódromo muestran los sectores en los que se localizan bodegas y oficinas.

En la imagen 5.18, se observa el velódromo junto a la falla oriente, en las que se muestran una franja representativa de 15 metros conjuntas a la falla incluidas para cotejar la separación que se tiene con la estructura. Las bodegas y oficinas mostradas en los recuadros verdes de la figura se distribuyen equitativamente en el velódromo, existiendo 19 bodegas por cada lado, con esto se procedió a dividir el análisis de daños estructurales del

velódromo en dos partes para poder realizar una comparativa con respecto a la distancia de la falla. El lado norte del velódromo es la zona de la estructura más cercana a la falla, dicha zona cuenta con 19 bodegas, entrada subterránea al centro del velódromo y parte de la trota pista donde se aprecia el paso de la falla (Figuras 5.19a y 5.19b).



Figura 5.19. a) paso de la falla geológica por trota pista b) Sector del velódromo más cercano a la falla geológica.

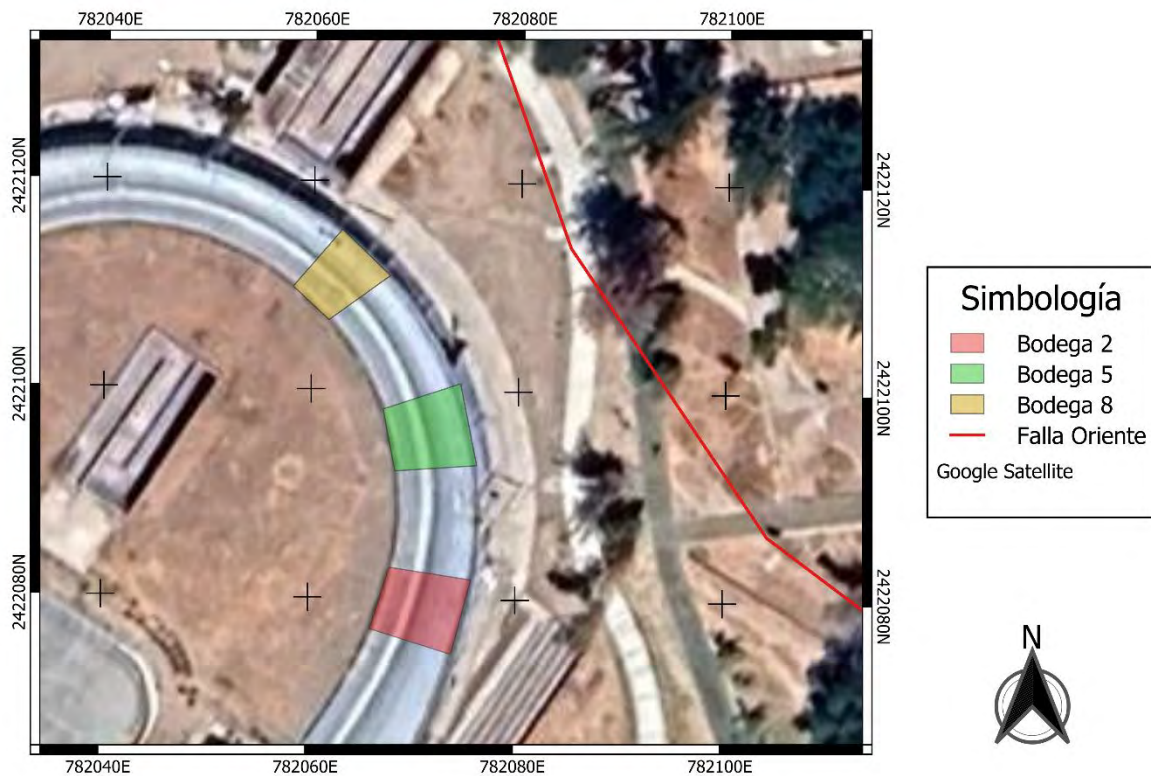


Figura 5.20. Ubicación de bodegas examinadas del velódromo.

5.3.2. Análisis de bodegas examinadas

En el presente capítulo se describirán los daños observados en las diferentes bodegas del velódromo, dentro del análisis únicamente se trabajaron con tres bodegas a causa de la falta de elementos para la correcta apertura de estas, esto generado por el deterioro de las instalaciones, en dicho análisis se distinguió como grieta a aquella ruptura que afecte al elemento y permitiera realizar mediciones de espesor y profundidad, y como fisura a aquella ruptura superficial en el elemento, aunado a esto debido a la variabilidad existente en las mediciones se trabajaron con magnitudes promedio.

➤ **Bodega dos.**

La bodega dos es la que se localiza a mayor distancia de la falla con relación a las bodegas analizadas. Dicha bodega está compuesta de elementos confinados, losa y divisiones con malla ciclónica, como se muestra en las fotografías de la figura 5.21.

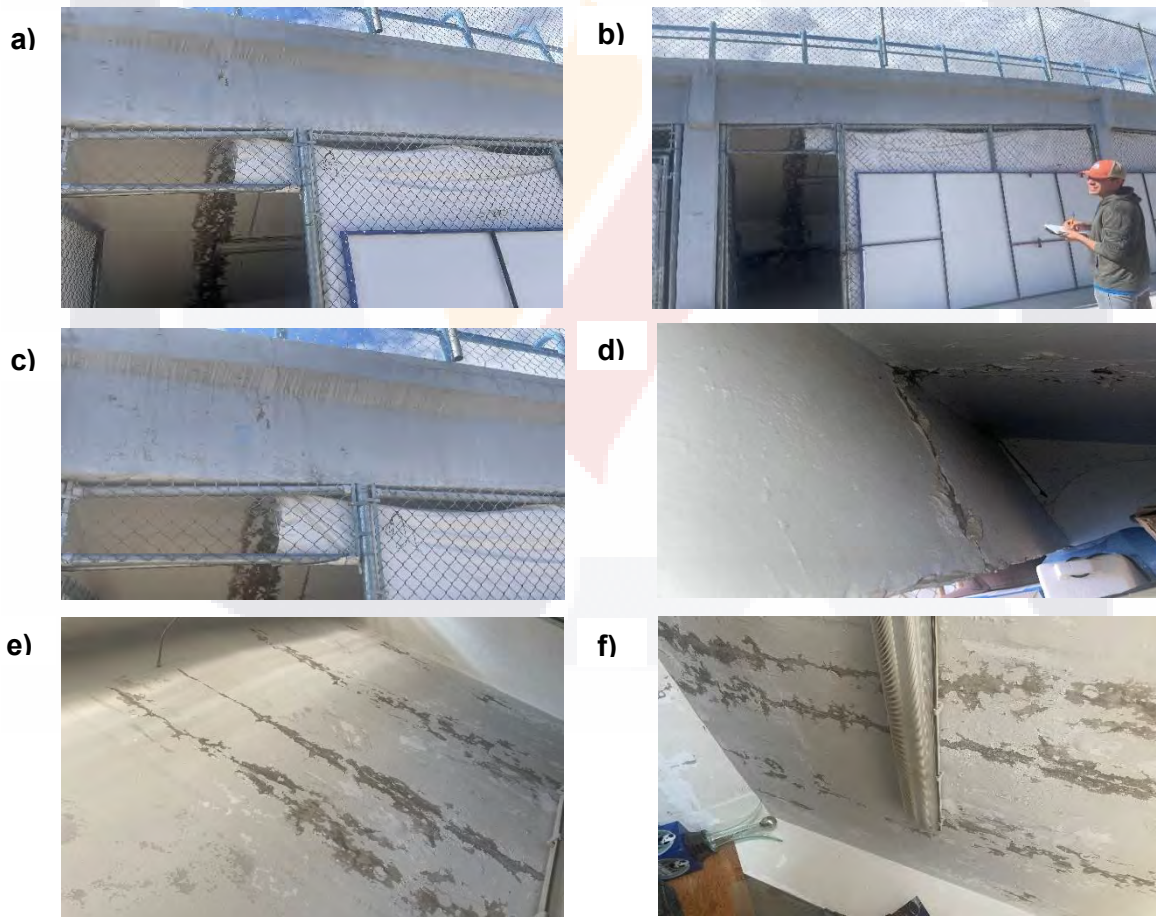


Figura 5.21. Daños presentados en la bodega dos

Los datos obtenidos del análisis realizado en cada uno de los elementos contenidos en la bodega se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Análisis de daños presentes en la bodega dos

Muros			
Las divisiones de la bodega están compuestas por malla ciclónica, por lo cual no se observan daños (Figuras 2.26 a-b).			
Elementos confinados			
Los elementos confinados presentan fisuras superficiales y descamación de pintura (Figuras 2.26 c-d).			
Losa			
La losa presenta descamación de pintura, grietas a lo largo de todo el elemento y fisuras superficiales (Fig. 2.26 e-f).			
Daño	Longitud (m)	Espesor (mm)	Profundidad (mm)
Grieta 1	2.2	7.71	16.02
Grieta 2	2	3.34	10.1
Fisura 1	1.8		
Fisura 2	2.7		



Figura 5.22. Mediciones realizadas en elementos dañados de la bodega dos

➤ **Bodega cinco.**

La ubicación de la bodega cinco se encuentra representada en la figura 5.20, dicha bodega cuenta con losa, elementos confinados y muros. La figura 5.23 muestra algunas de las afectaciones de dicha bodega.

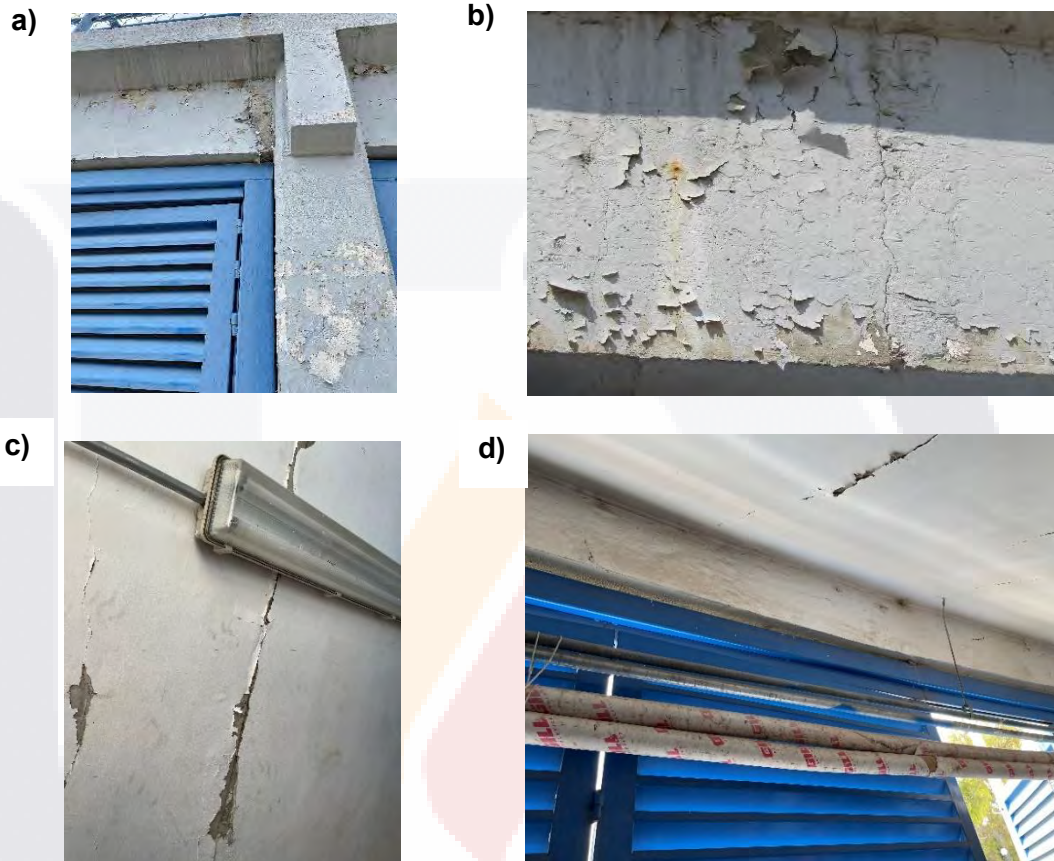


Figura 5.23. Daños presentados en bodega cinco, a) y b) daños presentados en elementos confinados, c) y d) daños en losa

Con el análisis realizado se percibieron diversos daños, expuestos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Análisis de daños presentes en la bodega cinco

Muros				
La bodega cinco contiene 3 muros, los cuales todos presentan descamaciones de pinturas y pequeñas fisuras en el repello				
Elementos confinados				
Los elementos valorados presentan descamaciones de pintura y pequeñas fisuras a lo largo de los elementos (Figuras 2.28 a-b).				
Losa				
La losa presenta descamación de pintura, grietas a lo largo de todo el elemento y fisuras superficiales (Figuras 2.28 c-d).				
Daño	Longitud descamación en repello (m)	Longitud fisura (m)	Espesor de descamación en recubrimiento (cm)	Abertura (mm)
Grieta 1	3.16	1.42	4	3
Grieta 2	3.16	1.8	3	3.8
Grieta 3	3.07	1.74	2	4.5
Fisura 1	2.71	1.05	2	
Fisura 2	1.77	0.84	3.4	
Fisura 3	2.83	1.54	3	



Figura 5.24. Mediciones realizadas en elementos dañados de la bodega cinco

➤ **Bodega ocho**

Como se muestra en la figura 5.20, la bodega ocho es la más cercana a la falla de las bodegas analizadas, dicha bodega cuenta con daños en losa, muro y elementos confinados (figura 5.25).

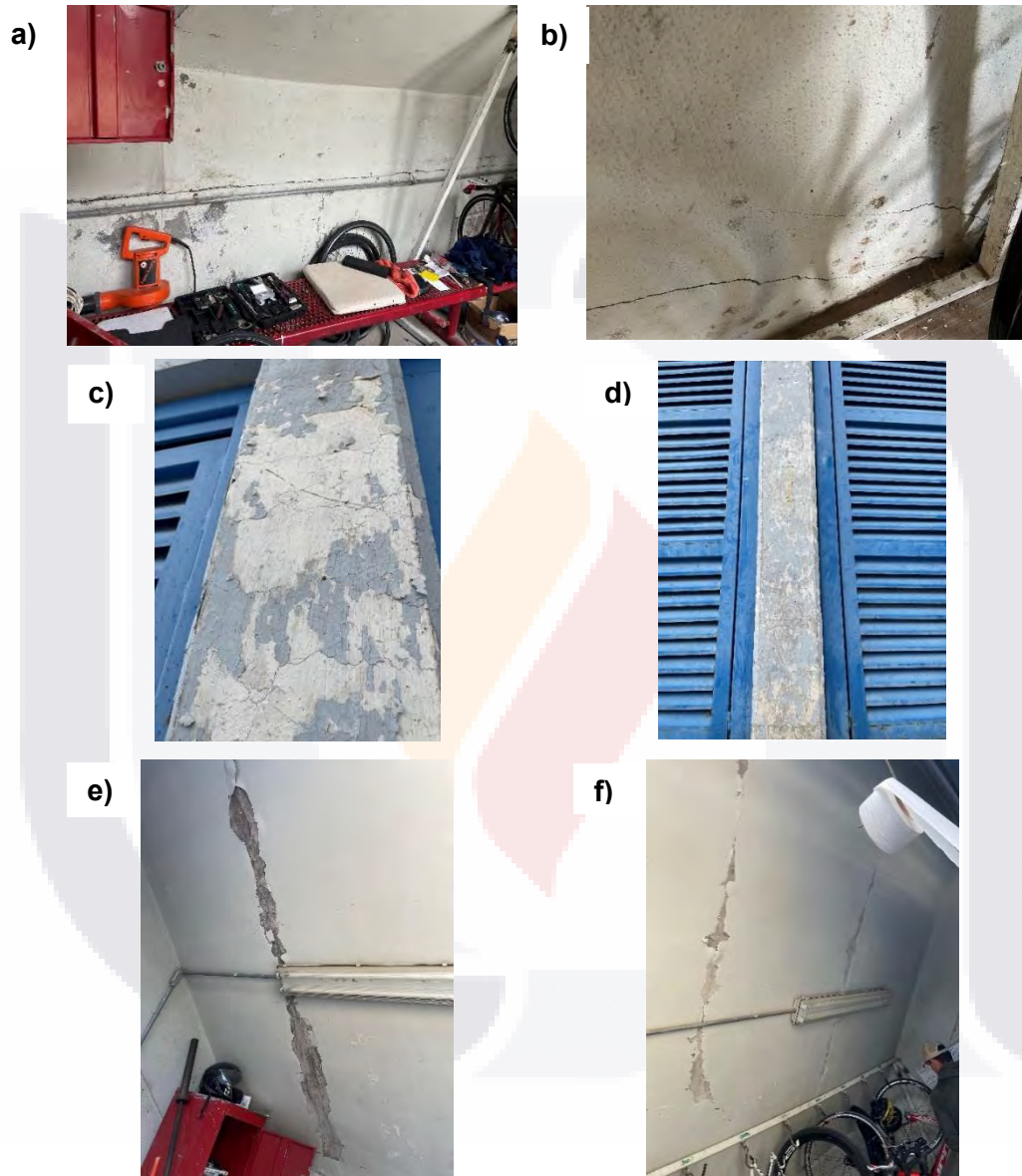


Figura 5.25. Daños presentados en bodega ocho, a) y b) daños presentes en muros, c) y d) daños en elementos confinados, e) y f) daños en losa.

Con el análisis realizado se observaron diversos daños, expuestos en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Análisis de daños presentes en la bodega ocho

Muros				
La bodega ocho contiene 3 muros, los cuales todos presentan descamaciones de pinturas, pequeñas fisuras en el repello y grietas en el elemento (Figuras 2.30 a-b).				
Daño	Longitud (m)		Apertura (mm)	Dirección
Grieta 1	1.25		4.33	Diagonal
Grieta 2	0.55		3.52	Diagonal
Elementos confinados				
Los elementos valorados presentan descamaciones de pintura y pequeñas fisuras a lo largo de los elementos (Figuras 2.30 c-d).				
Losa				
La losa presenta descamación de pintura, grietas a lo largo de todo el elemento y fisuras superficiales (Figuras 2.28 e-f).				
Daño	Longitud descamación en repello (m)	Longitud fisura (m)	Espesor de descamación en recubrimiento (cm)	Apertura (mm)
Grieta 1	2.50	2.00	15	3.2
Grieta 2	1.00	0.65	2	5
Grieta 3	1.60	1.25	6	1.41
Fisura 1	2.55	2.05	3	

➤ **Densificación de fisuras y grietas**

Con el fin de establecer las zonas con más daños en el velódromo, se realizó un mapeo de las fisuras y grietas que existen en la pista, para que con ello se pudiera establecer si la discontinuidad presente tiene influencia en los daños de la estructura. Cabe resaltar que dicha estructura se encuentra desplantada sobre el bloque de techo de la falla, siendo una zona con más actividad, en comparación con el bloque de piso.

Para mejor visualización de los resultados se utilizaron técnicas de fotogrametría como se muestra en la figura 5.26.



Figura 5.26 Mapeo de fisuras y grietas en la pista del velódromo utilizando la técnica de fotogrametría

La falta de mantenimiento en edificaciones se refleja con el deterioro que éstas presentan, pero en esta situación se podrían agregar los movimientos que genera la falla oriente.

Las líneas observadas en la pista del velódromo hacen referencia a las fisuras y grietas que afectan directamente al elemento, por lo que podemos observar en la figura 5.26 que el lado con mayor afectación es el que se encuentra próximo a la discontinuidad, al mismo tiempo observamos el lado opuesto donde se encuentran afectaciones en menor medida.

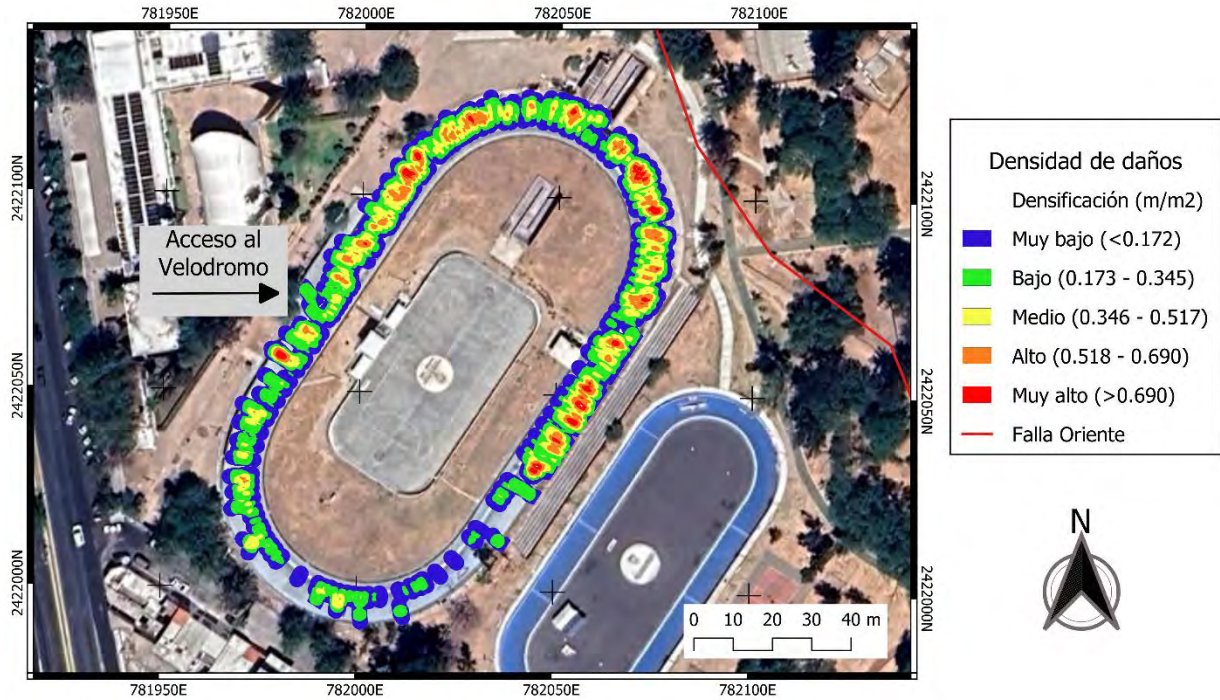


Figura 5.27. Mapa de densificación de fisuras y grietas. La representación del color rojo intenso nos indica una zona con acumulación alta de grietas y fisuras, el color amarillo indica presencia de grietas y fisuras con una separación mayor y el color azul representa zonas con nulas anomalías.

La figura 5.27 muestra la densificación de grietas y fisuras contenidas en la pista del velódromo, En la imagen se puede apreciar que en la zona más cercana a la falla existe en gran medida regiones con color rojo indicando fuertes afectaciones y en la zona del velódromo más alejada a la falla se aprecian colores como azul, verde y en muy pocas regiones amarillo, con ello se aprecia que existen mayores daños con forme se encuentre más cercana la falla

6. Discusión de resultados

Se levantaron perfiles de refracción sísmica en las tres zonas de estudio a partir de los análisis con las dromocronas y gráficas de velocidades de onda, esto debido a que la velocidad de la onda está en función de la densidad del material, y si en esta no existe cambios de densidad o presencia de discontinuidades, entonces la velocidad debería aumentar de forma constante, pero con la presencia de estas anomalías la velocidad tenderá a la baja. A continuación se discuten por zonas los resultados del método de refracción sísmica.

Zona de estudio uno

En la zona de estudio uno se llevaron a cabo dos sondeos con diferente distribución de geófonos, obteniendo dromocronas y grafico de velocidades a cada una. El sondeo con arreglo de 1.5 metros tuvo una longitud de 34.5 metros, con 17.25 metros a cada lado de la discontinuidad (Figuras 5.4 y 5.8). En esos gráficos se observa que las anomalías se distribuyen a lo largo de todo el sondeo, teniendo velocidades bajas en la parte central debido al paso de la onda a través de la discontinuidad. Por su parte, en el sondeo con arreglo de 3 m se tuvo una longitud de sondeo de 69 metros, con 34.5 metros a cada lado de la discontinuidad, En este último sondeo se observó la presencia de anomalías a partir de los 6 metros del sondeo y hasta los 60 metros (Figura 5.5), donde existen dos regiones con disminución de velocidades, la primera del lado del bloque de techo a partir de la discontinuidad hasta los 13.5 metros y la segunda del lado del bloque de piso desde la discontinuidad hasta los 12 metros (figura 5.9).

Los gráficos señalan la zona de mayor actividad de la falla, la cual para este caso se indica para el bloque de techo una distancia de restricción total de 28 metros y para el lado del bloque de piso una distancia de 14 metros, las regiones aledañas a esta restricción se catalogan como zona de transición.

Zona de estudios dos

En la zona de estudio dos se llevaron a cabo dos sondeos de refracción sísmica con diferente distribución entre geófonos, primeramente se planteó un arreglo de 1.5 metros con una longitud de sondeo de 34.5 metros, con 17.5 metros a cada lado de la discontinuidad y en el arreglo de 3 metros teniendo una longitud de sondeo de 69 metros, con 22.5 metros del bloque de techo y 45.5 metros en el bloque de piso, esto debido a la presencia de obstáculos en el terreno los cuales hicieron imposible la extensión del estudio.

Los gráficos de las figuras 5.12, 5.13, 5.16, 5.17 indican la zona de actividad de la falla, la cual para este caso será una zona de restricción total de 13.5 metros para el lado del bloque de piso y en el bloque de techo una distancia de 19.5 metros, en la figura 5.13 se observa que conforme el estudio se aleja de la falla geológica la onda sísmica comienza a estabilizarse, por lo que las regiones aledañas serán catalogadas como zona de transición de la falla.

Zona de estudio tres

En la zona de estudio tres se llevó a cabo un sondeo con una distribución entre geófonos de 1.5 metros teniendo un ancho de estudio de 34.5 metros, en dicha zona fue imposible extender la investigación debido a la presencia de obstáculos en el terreno.

Los gráficos (Figura 5.20, 5.22) nos señalan la zona de mayor actividad de la falla, la cual para este caso indica una zona de restricción total de 12 metros para el bloque de techo y para el bloque de piso una distancia de 7 metros, en la figura 5.22 se puede apreciar que en la zona del bloque de piso las velocidades van en aumento lo cual nos indica que no existen mayores anomalías por lo que se reduce el ancho de afectación.

Evaluación de daños en el velódromo

En el estudio realizado al velódromo se detectaron zonas con alta densificación de fisuras y grietas, una de ellas se encuentra ubicada en el acceso al velódromo estando a una distancia aproximada de 60 metros a la falla, dicha zona fue utilizada para dar acceso a maquinaria pesada al centro del velódromo, esto debido a los procesos constructivos necesarios para la construcción de la cancha situada en el centro de esta edificación hace aproximadamente 6 años, es por ello que se supone que los excesivos daños en esta zona

fueron potencializados por dicho suceso, la segunda zona se encuentra a escasos 20 metros de la traza de la discontinuidad, por lo que en la figura 5.32 se observa que la zona con mayores afectaciones se encuentra del lado de la discontinuidad y con ello se percibe que los movimiento de la falla potencializan los daño que existe en la estructura.

Análisis de los dos métodos aplicados

Analizando los datos obtenidos de los estudios geofísicos se recomienda considerar un ancho de influencia de la falla variable, ya que la discontinuidad no se comporta mecánicamente de la misma forma a lo largo de la traza. Así, el área con mayor afectación se ubica en las inmediaciones de la Av. Adolfo López Mateos y la de menor afectación en la zona 3 de estudio, con un ancho de afectación de 12 metros. Cabe recalcar que el velódromo se localiza entre las zonas de estudio 2 y 3, debido a las afectaciones analizadas anteriormente los mayores daños en la estructura se extienden hasta los 20 metros, siendo conveniente aplicar un factor de seguridad para extender el área de restricción total.



Figura 6.1. Ancho de influencia variable de la falla oriente en el área del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes considerando únicamente los sondeos Geofísicos

Para este estudio se propone tomar en cuenta un factor de reforzamiento que se aplique a las distancias de influencia de la falla obtenidas con ayuda de sondeos geofísicos, teniendo que la estructura analizada se encuentra en el bloque de techo entre el sondeo dos con una distancia de restricción total de 19.5 metros y el sondeo tres con una restricción

total de 12 metros, en la figura 6.2 se observa la variación de la influencia de la falla por lo que en la zona del velódromo se tiene una zona de influencia de aproximadamente 14.5 metros, mientras que los daños del velódromo se observan en la figura 5.32 donde existe una diferencia notable entre los dos sectores del velódromo teniendo menores daños en el sector más retirado a la falla presentando colores verdes y azules lo cual indica una densificación baja y muy baja, respectivamente, y los mayores daños en el lado más cercano a la falla con zonas mayormente marcadas de color rojo, naranja y amarillo consideradas como densificación muy alto, alto y medio respectivamente, las zonas de mayor densificación de encuentran a 25 metros de la línea de falla, por lo que las afectaciones generadas por el movimiento repercuten en la estructura a una mayor distancia que el afectado mecánicamente obtenido mediante geofísica, con estos datos y para mayor seguridad de los inmuebles se plantea un factor de reforzamiento de 1.7 para que con ello las futuras infraestructuras en la misma área de estudio se desplanten en una zona estable.

$$F.R. = \frac{\text{Distancia entre la línea de falla y el punto de mayor afectación en estructuras}}{\text{Distancia mecánicamente afectada (Obtenida por geofísica)}}$$

En la zona del velódromo se tendrá 14.5 metros de restricción total y próximo a eso 10.5 metros de reforzamiento mediante diseños que trabajen en armonía con los movimientos de la falla, cabe recalcar que el análisis del factor de reforzamiento se realizó únicamente para el bloque de techo (lado sur-poniente) de la discontinuidad, esto debido a la existencia de edificaciones en el área.

La seguridad de la población que habitara en las colindancias de una falla activa depende de una correcta valoración del ancho de influencia que esta genera, las construcciones ahí desplantadas tendrán una vida útil de aproximadamente 50 años en los cuales los efectos de subsidencia se incrementaran debido a los procesos antropogénicos como lo es la sobreexplotación de mantos acuíferos, esto será el patrimonio de muchas familias, por lo que es imprescindible considerar primordial la seguridad teniendo una perspectiva a futuro.

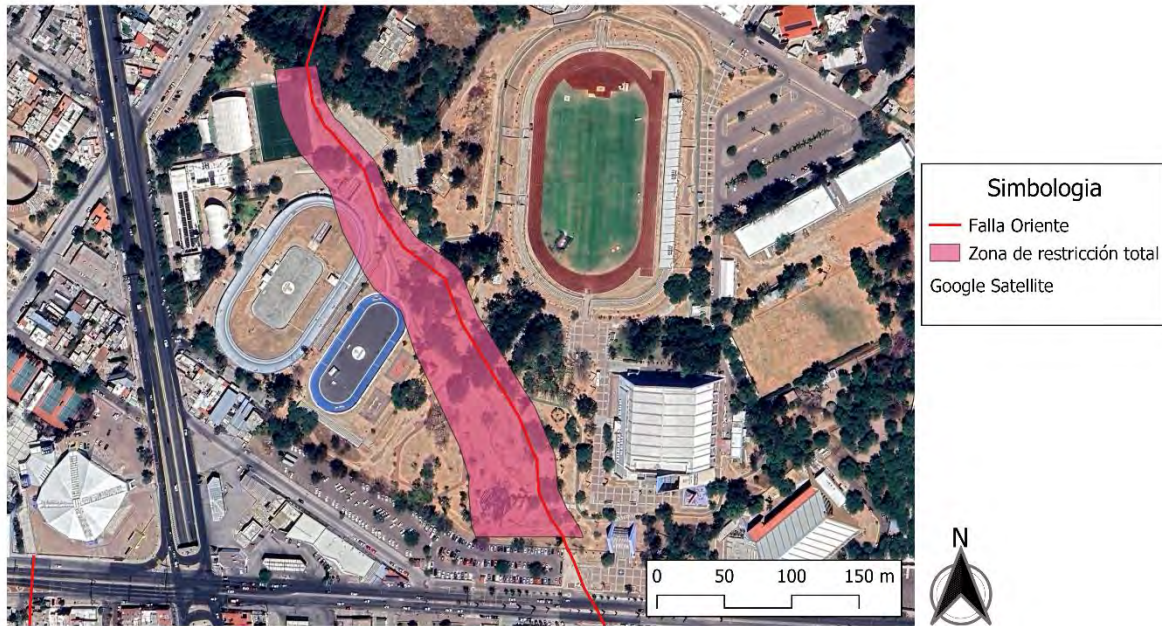


Figura 6.2. Ancho de influencia variable de la falla oriente en el área del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes aplicando el factor de seguridad correspondiente

La presencia de discontinuidades genera daños importantes en edificaciones cercanas, por lo que se requiere conocer la zona de influencia que ejerce la discontinuidad, para ello se realizan los siguientes pasos.

1. Efectuar una exploración en la zona de estudio con el fin de encontrar discontinuidades superficiales, para ello es posible apoyarse con bases datos obtenidos a partir de medios confiables como lo es el SIFAGG, esto en el estado de Aguascalientes.
2. Implementar pruebas Geofísicas de refracción sísmica y con ello construir dromocronas y gráficos de velocidades para obtener la zona de influencia de la falla, si el arreglo utilizado no abarca en su totalidad la zona de influencia será necesario realizar otro sondeo con un arreglo de geófonos mayor, se tendrán que realizar las mediciones necesarias para obtener datos confiables.
3. Realizar una inspección de daños en las edificaciones aledañas a la discontinuidad cotejando las zonas que presentan mayores afectaciones y la distancia a la que se encuentran de la discontinuidad.
4. Tomando en cuenta los datos obtenidos anteriormente se procede a plantear un factor de reforzamiento (F.R.) apto para la zona de estudio.

7. Conclusión

Las fallas superficiales activas debidas a subsidencia provocan afectaciones a infraestructura cercana a ellas, como lo es el caso del Instituto del Deporte del Estado de Aguascalientes el cual tiene una estructura cercana a ella presentando deterioros importantes.

Los datos obtenidos mediante 5 estudios de refracción sísmica realizados en 3 zonas de estudio presentaron zonas de influencia variable dentro del IDEA, los cuales van desde los 7 metros hasta los 28 metros considerándolos como zona de restricción total, aunado a esto los datos obtenidos mediante la ubicación de afectaciones en el velódromo indico que existen daños importantes en el sector más cercano a la falla con zonas de densificación muy alta de daños a 20 metros y 30 metros (figura 5.27). Examinando los datos geofísicos obtenidos se estableció una zona de restricción total en el área donde se encuentra ubicado el velódromo de 14.5 metros y cotejando con los daños analizados de la estructura se observa que la afectación real de la falla ocurre a una distancia mayor que la dada únicamente por métodos geofísicos, por lo que se tiene un factor de reforzamiento de 1.7 para la zona de estudio.

Bibliografía

- Acuña-Lara, F., Pacheco-Martínez, J., Luna-Villavicencio, H., Hernández-Marín, M., & González-Cervantes, N. (2020). Infiltration of surface water through subsidence failure assessment applying electric prospecting, case Aguascalientes Valley, México. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 5–9. <https://doi.org/10.5194/PIAHS-382-5-2020>
- Aguilar Valdez, J. (2023). *Resultados de la Exploración Geofísica en el Área de reparación de la Falla Oriente*.
- Akintorinwa, O. J., & Adesoji, J. I. (2009). Application of geophysical and geotechnical investigations in engineering site evaluation. *International Journal of Physical Sciences*, 4(8), 443–454. <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- Alvarez, A., & Aceves, M. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil*.
- Aranda Gómez, J., & Aranda Gómez, J. J. (1985). *Análisis del agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes*.
- Arroyo Contreras, G. M., & Zermeño de León, M. Eduardo. (2004). *El agrietamiento en Aguascalientes: causas y efectos*. 232.
- Babín, R., & Gómez, D. (2010). *Geología Estructural*.
- Bouwer, H. (1977). Land Subsidence and Cracking Due to Ground-Water Depletion. *Ground Water*, 15(5), 358–364. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1977.tb03180.x>
- Burbey, T. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525–538. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- Cesar, J., Rodríguez, D., Sánchez Ruiz, E., Quimiz, L., Macías, S., & Salvador, M. (2019). *Fallas Geológicas en la tierra generadas por sismos*.
- Cesar, J., Rodríguez, D., Sánchez Ruiz, E., Quimiz, L., Macías, S., & Salvador, M. (2019). *Fallas Geológicas en la tierra generadas por sismos*.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112254. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112254>
- Cortez, F. J. (2012). *Recarga artificial de acuíferos mediante pozos de infiltración*. 1–72. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112265>
- Daito, K., & Galloway, D. L. (2015). Preface: Prevention and mitigation of natural and anthropogenic hazards due to land subsidence. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 555–557. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-555-2015>

- de Lira-Gómez, P., Pacheco Martínez, J., & Hernández Marín, M. (2015, October 16). *Estudio de la vulnerabilidad estructural de las construcciones ante fracturamiento por subsidencia*.
- González, G., & Carrizo, D. (2003). Segmentación, cinemática y cronología relativa de la deformación tardía de la Falla Salar del Carmen, Sistema de Fallas de Atacama, (23°40'S), norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, 30(2), 223–244. <https://doi.org/10.4067/S0716-02082003000200005>
- Groves, P., Cascante, G., Dundas, D., & Chatterji, P. K. (2011). Use of geophysical methods for soil profile evaluation. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1364–1377. <https://doi.org/10.1139/t11-044>
- Helm, D. C. (1994). Hydraulic forces that play a role in generating fissures at depth. *Environmental & Engineering Geoscience*, 293–304.
- Henríquez Pantaleón, C. I. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación - Archivo Digital UPM* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/379/>
- Hernández-Marín, M., & Burbey, T. J. (2010). Controls on initiation and propagation of pumping-induced earth fissures: insights from numerical simulations. *Hydrogeology Journal*, 18(8), 1773–1785. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0642-9>
- Hernández-Marín, M., & Burbey, T. J. (2012). Fault-controlled deformation and stress from pumping-induced groundwater flow. *Journal of Hydrology*, 428–429, 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.025>
- Hernández-Marín, M., González-Cervantes, N., Pacheco-Martínez, J., & Frías-Guzmán, D. H. (2015). Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 235–238. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-235-2015>
- Holzer, T. L. (1984). Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. In T. L. Holzer (Ed.), *Man-Induced Land Subsidence* (Vol. 6, pp. 67–106). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/REG6-p67>
- Huang, B., Shu, L., & Yang, Y. S. (2012). Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling. *Water Resources Management*, 26(14), 4225–4239. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y>
- Instituto nacional de prevención sísmica (INPRES). (2015). Instituto nacional de prevención sísmica (INPRES). *Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES)*, 1–11. <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Fallas Geológicas.pdf>
- Iriondo, M. H. (2009). *Introducción a la geología (2a. ed.)*. Editorial Brujas. <https://elibro.net/es/lc/uaa/titulos/78025>
- Jaime P., A., Alcocer, G., Barrera González, J., Sanabria Pérez, J. S., Jaime P., A., Alcocer, G., Barrera González, J., & Sanabria Pérez, J. S. (2022). Análisis de asentamientos súbitos por sismo y subsidencia en la Ciudad de México, por medio de imágenes

satelitales. *Ingeniería Sísmica*, 108(SPE108), 23–52.
<https://doi.org/10.18867/RIS.108.592>

Luna Villavicencio, H. (2018). Estudio de Susceptibilidad de Fracturamiento y Fallamiento del Terreno Debido a Subsistencia y Reactivación de Paleocauces en el Municipio de Jesús María, Aguascalientes. [Tesis maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. In *Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción*. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/587>

Luna-Villavicencio, H., Pacheco-Martínez, J., Acuña-Lara, F., Hernández-Marín, M., & González-Cervantes, N. (2020). Application of seismic prospecting to determine the width of influence of surface faults associated to land subsidence a case of study in the Aguascalientes Valley, México. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 781–785. <https://doi.org/10.5194/PIAHS-382-781-2020>

Martínez Pagan, P. (2014). *Prospección geofísica 2: métodos sísmicos*. Universidad Politécnica de Cartagena. <https://elibro.net/es/lc/tessanfe/titulos/59883>

McCalpin, J. P. (1987). Recommended setback distances from active normal faults. *Proceedings of the Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering*, 23, 35–56.

Pacheco Martínez, J. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México].
https://www.researchgate.net/publication/242013157_Modelo_de_subsidencia_del_valle_de_Queretaro_y_prediccion_de_agrietamientos_superficiales

Pacheco Martínez, J., Ángel, J., Zermeño de León, M., & Mendoza Otero, E. (2012, June 1). *Líneas de investigación vigentes y pertinentes en subsidencia y generación de agrietamientos*.

Pacheco Martínez, J., Otero, E., Lermo Samaniego, J., Hernández Marín, M., González-Cervantes, N., Aguilar-Valdés, F., Ortiz, J., & Zermeño-de-León, M. (2013). *Sismicidad en zonas de subsidencia. Caso Aguascalientes*.

Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-León, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172–186.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGCEO.2013.06.015>

Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-León, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172–186.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGCEO.2013.06.015>

RACEFN *Glosario de Geología*. (n.d.). Retrieved February 8, 2023, from https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#S

Robert Burger, H., Sheehan, A., & Jones, C. (2006). *Introduction to APPLIED GEOPHYSICS*.

Rodríguez-Castillo, R. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265–269. <https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a10>

Sánchez Currihuinca, L. E. (2016). *Ponderación de factores antropogénicos y naturales que causarían la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143591>

Schmidt, V. (2010). Clasificación de suelos basada en el cálculo de razones espectrales en sitios donde se ubican estaciones acelerográficas de América Central. Casos de El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 44. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i44.3443>

Código de Ordenamiento Territorial, Desarrollo Urbano y Vivienda para el Estado de Aguascalientes, 405 (2018).

SEGUOT. (2023). *Área de afectación Falla Oriente Alberca Olímpica*.

Sheng, Z. (2003). Mechanisms of Earth Fissuring Caused by Groundwater Withdrawal. *Environmental and Engineering Geoscience*, 9(4), 351–362. <https://doi.org/10.2113/9.4.351>

Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología*.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). *SUBSIDENCIA DEL TERRENO Ground subsidence CORE View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk provided by Revistes Catalanes amb Accés Obert*. 17(3), 1132–9157.

Trejo Corona, D. S. (2021). *Revisión del criterio del área de afectación aledaña a fallas y grietas en la ciudad de Aguascalientes* [Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/2193>

Universidad Técnica de Loja. (04 de diciembre de 2008). *Recuperado el septiembre de 2013, de Un blog Sobre Metodología de la Investigación: <http://blogs.utpl.edu.ec/metodologiainvestigacion/2008/12/04/fallas-geológicas/>*. (n.d.).

Vargas, L. E. (2019). Análisis estratigráfico de una zona con alto riesgo al deslizamiento por medio de métodos de prospección geofísica. *Revista de La Escuela de Física*, 3(1), 22–27. <https://doi.org/10.5377/REF.V3I1.8300>

Zermeño, M., Esquivel, R., Hernández, A., Mendoza, E., & Arellano, J. (2005). Influencia de la Extracción del Agua en la Subsidencia y Agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 13, 15–22. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67412005003>



Anexos

Pendientes correspondientes a las dromocronas del correspondiente a la zona de estudio uno con un arreglo de geófonos de 1.5m.

Tabla de pendientes					
Distancia (m)	Fuentes sísmicas				
	0.75 m	8.25 m	17.25 m	26.25 m	35.25 m
-0.75 - 0	2.667				
0 - 1.5	2.412	-0.697	-0.434	-0.537	-0.525
1.5 - 3	2.474	-1.935	-5.202	-0.469	-0.810
3 - 4.5	1.096	-0.990	-3.191	-1.006	-0.382
4.5 - 6	1.346	-2.106	-1.647	-0.929	-0.347
6 - 7.5	0.761	-2.090	-1.613	-0.310	-1.561
7.5 - 8.25	1.229	-2.941	-3.174	-0.929	-1.405
8.25 - 9	1.229	1.858	-3.174	-0.929	-1.405
9 - 10.5	1.814	2.696	-1.769	-2.245	-2.636
10.5 - 12	3.570	0.719	-2.289	-0.542	-0.725
12 - 13.5	1.346	1.925	-0.867	-2.941	-2.085
13.5 - 15	5.092	1.625	-4.613	-3.728	-1.804
15 - 16.5	2.692	3.328	-2.844	-2.541	-1.214
16.5 - 17.25	2.267	4.180	-3.121	-6.811	-4.093
17.25 - 18	2.267	4.180	2.029	-6.811	-4.093
18 - 19.5	5.224	6.579	2.593	-1.238	-2.896
19.5 - 21	2.107	0.619	2.896	-2.090	-2.861
21 - 22.5	4.390	1.006	3.000	-1.625	-2.705
22.5 - 24	1.285	1.935	2.856	-2.974	-0.572
24 - 25.5	0.225	2.245	3.023	-3.012	-1.821
25.5 - 26.25	1.006	1.393	2.792	-0.567	-2.410
26.25 - 27	1.006	1.393	2.792	4.662	-2.410
27 - 28.5	1.145	1.548	2.908	2.048	-0.434
28.5 - 30	0.225	0.232	2.850	2.048	-1.526
30 - 31.5	0.069	4.876	2.064	2.048	-1.526
31.5 - 33	0.329	0.997	1.023	2.048	-3.139
33 - 34.5	0.139	0.875	1.179	2.048	-3.468
34.5 - 35.25					-3.330

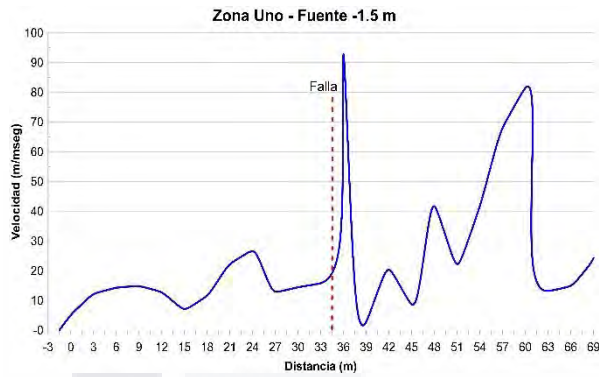
Zona de estudio uno, Arreglo de geófonos a cada 1.5m.



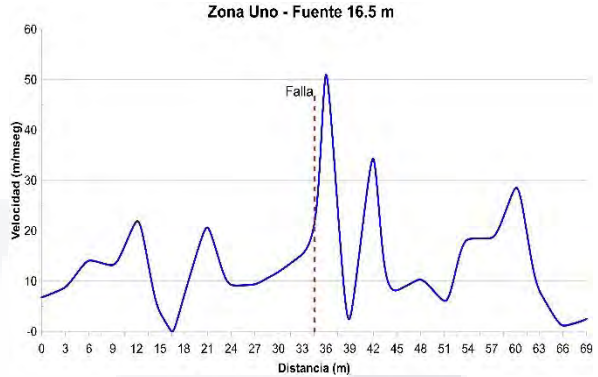
Gráficos de velocidades sondeo uno @1.5m por fuentes sísmicas realizadas. a) Fuente sísmica -0.75m b) Fuente sísmica 8.25m c) Fuente sísmica 17.25m d) Fuente sísmica 26.25m e) Fuente sísmica 35.25m

Zona de estudio uno, Arreglo de geófonos a cada 3m.

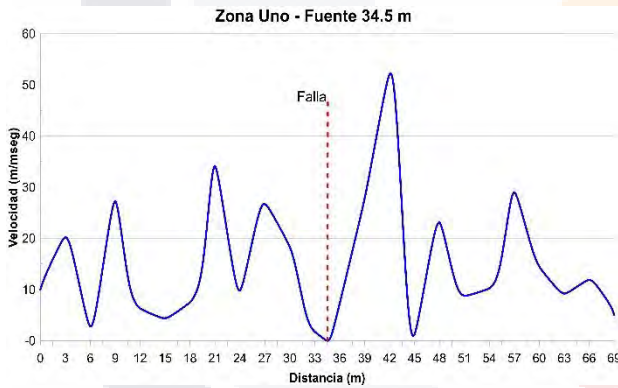
a)



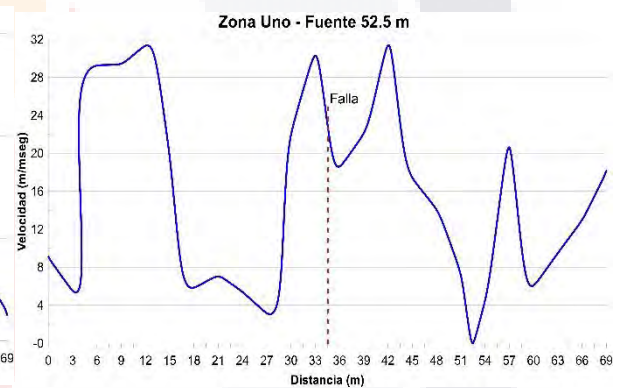
b)



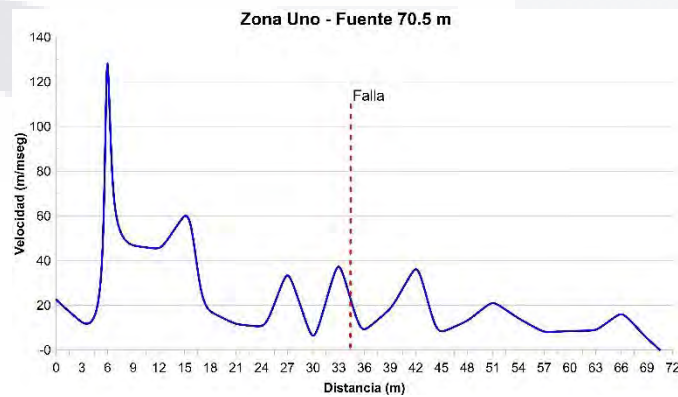
c)



d)



e)

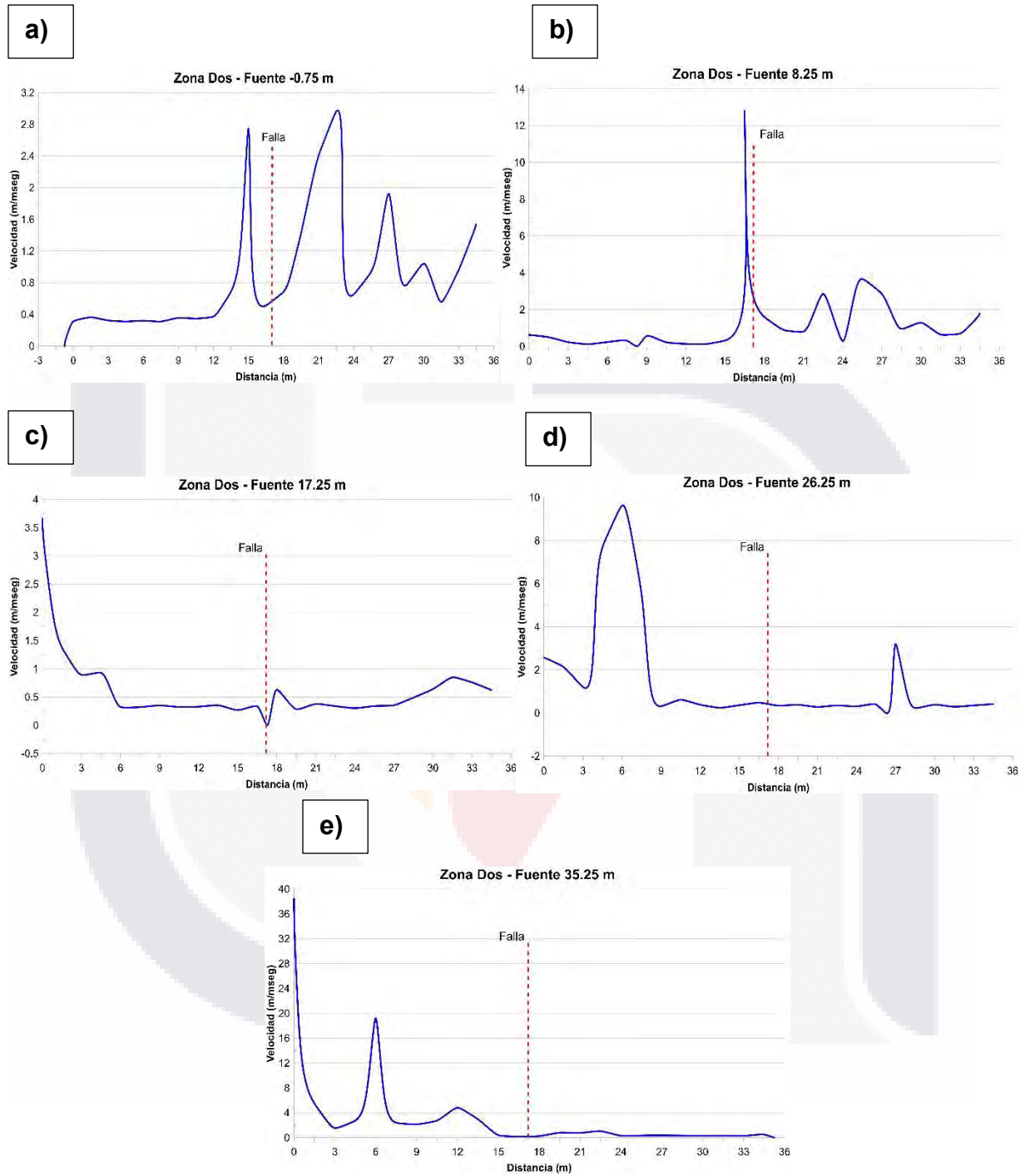


Gráficos de velocidades sondeo uno @3m por fuentes sísmicas realizadas. a) Fuente sísmica -1.5m b) Fuente sísmica 16.5m c) Fuente sísmica 34.5m d) Fuente sísmica 52.5m e) Fuente sísmica 70.5m

Pendientes correspondientes a las dromocronas del correspondiente a la zona de estudio dos con un arreglo de geófonos de 1.5m

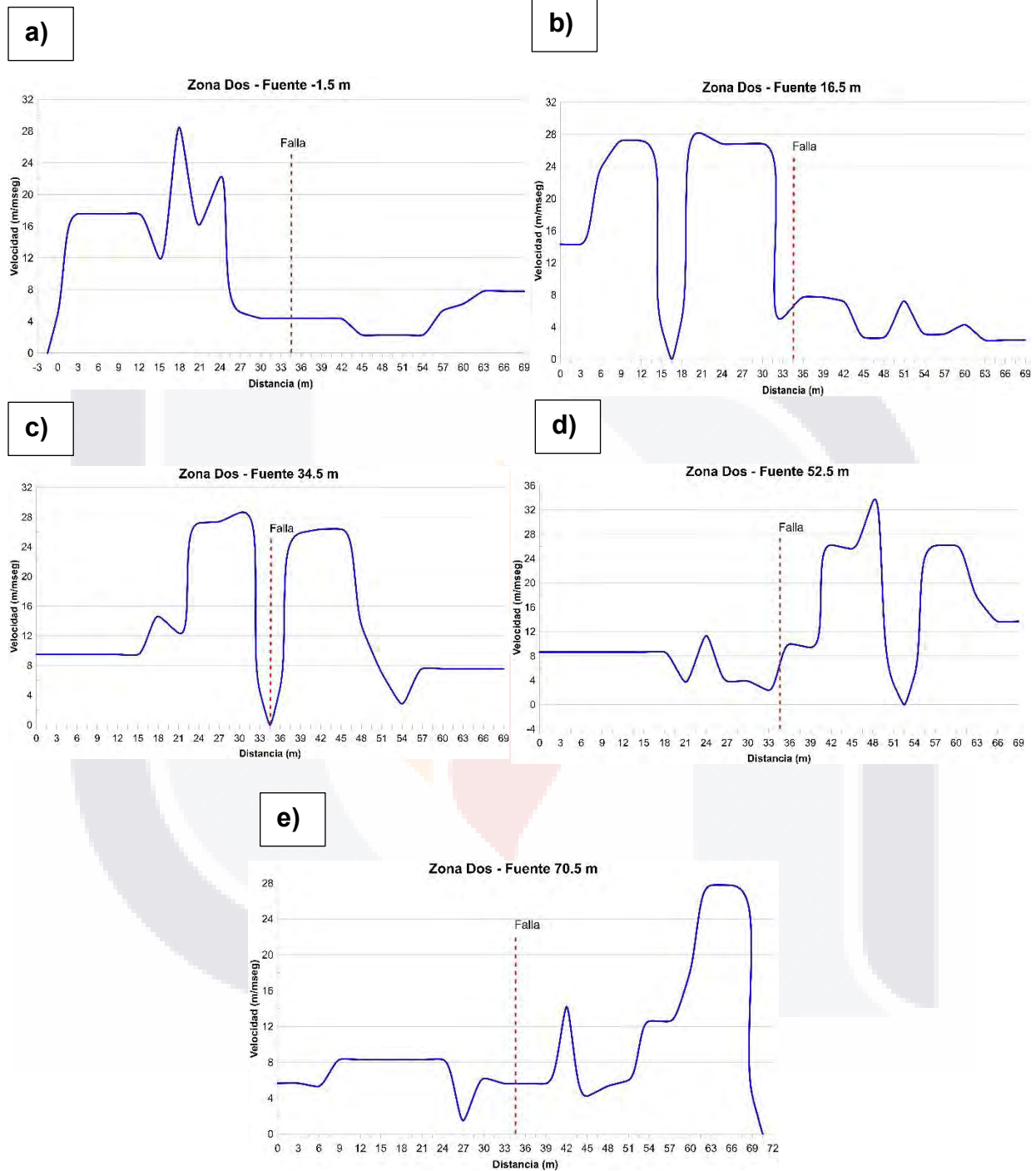
Tabla de pendientes					
Distancia (m)	Fuentes sísmicas				
	0.75 m	8.25 m	17.25 m	26.25 m	35.25 m
-0.75 - 0	3.226	45.769	52.909	70.337	83.343
0 - 1.5	2.757	-1.619	-0.273	-0.390	-0.026
1.5 - 3	3.095	-2.029	-0.727	-0.468	-0.182
3 - 4.5	3.226	-4.487	-1.121	-0.832	-0.650
4.5 - 6	3.121	-8.740	-1.078	-0.130	-0.364
6 - 7.5	3.226	-4.370	-3.082	-0.104	-0.052
7.5 - 8.25	2.809	-3.278	-3.121	-0.182	-0.416
8.25 - 9	2.809	1.795	-3.121	-0.182	-0.416
9 - 10.5	2.887	4.604	-2.848	-3.174	-0.468
10.5 - 12	2.679	7.726	-3.095	-1.639	-0.364
12 - 13.5	1.457	8.439	-3.043	-2.627	-0.208
13.5 - 15	0.364	3.188	-2.835	-4.162	-0.338
15 - 16.5	1.951	0.078	-3.726	-2.793	-2.549
16.5 - 17.25	1.457	0.624	-3.006	-2.097	-5.723
17.25 - 18	1.457	0.624	1.595	-2.097	-5.723
18 - 19.5	0.702	1.132	3.520	-2.939	-4.058
19.5 - 21	0.416	1.249	2.653	-2.627	-1.255
21 - 22.5	0.338	0.351	2.965	-3.590	-1.320
22.5 - 24	1.535	3.356	3.312	-2.861	-0.962
24 - 25.5	1.067	0.273	2.948	-3.278	-3.278
25.5 - 26.25	0.520	0.351	2.827	-2.549	-2.939
26.25 - 27	0.520	0.351	2.827	0.312	-2.939
27 - 28.5	1.301	1.053	2.046	4.318	-2.861
28.5 - 30	0.962	0.780	1.561	2.601	-2.965
30 - 31.5	1.795	1.565	1.179	3.460	-3.147
31.5 - 33	1.040	1.440	1.318	2.861	-2.991
33 - 34.5	0.650	0.560	1.613	2.419	-3.538
34.5 - 35.25					-2.029

Zona de estudio dos, Arreglo de geófonos a cada 1.5m.



Gráficos de velocidades sondeo dos por fuentes sísmicas realizadas. a) Fuente sísmica artificial -0.75m, Fuente sísmica artificial 8.25m, Fuente sísmica artificial 17.25m, Fuente sísmica artificial 26.25m, Fuente sísmica artificial 35.25m

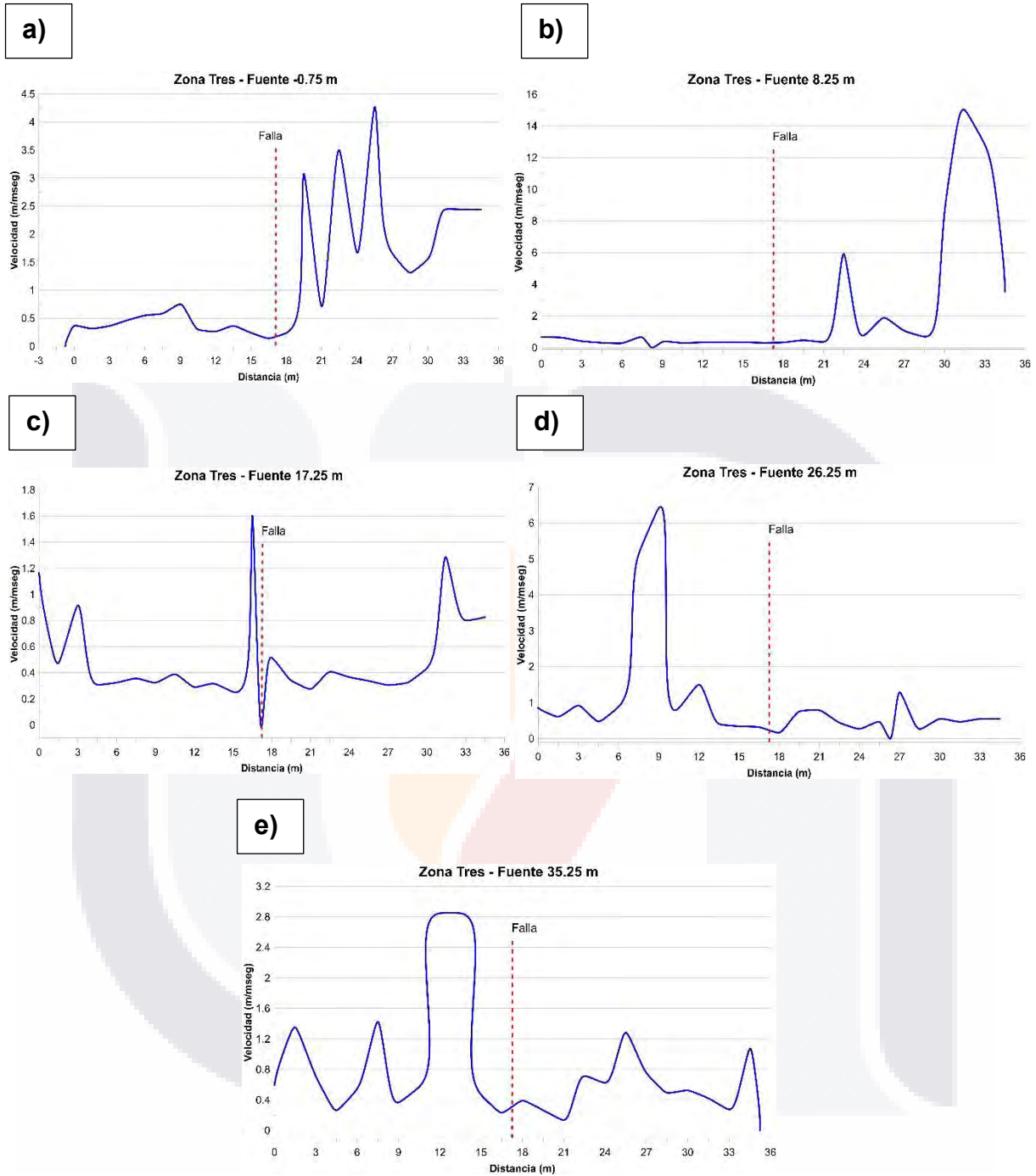
Zona de estudio dos, Arreglo de geófonos a cada 3m.



Gráficos de velocidades sondeo uno @3m por fuentes sísmicas realizadas. a) Fuente sísmica -1.5m b) Fuente sísmica 16.5m c) Fuente sísmica 34.5m d) Fuente sísmica 52.5m e) Fuente sísmica 70.5m

Pendientes correspondientes a las dromocronas del correspondiente a la zona de estudio tres con un arreglo de geófonos de 1.5m

Tabla de pendientes					
Distancia (m)	Fuentes sísmicas				
	0.75 m	8.25 m	17.25 m	26.25 m	35.25 m
-0.75 - 0	2.757				
0 - 1.5	3.174	-1.491	-0.858	-1.171	-1.678
1.5 - 3	2.757	-1.578	-2.107	-1.639	-0.741
3 - 4.5	2.159	-2.434	-1.093	-1.093	-1.405
4.5 - 6	1.821	-3.237	-3.239	-2.104	-3.785
6 - 7.5	1.711	-3.491	-3.082	-1.134	-1.834
7.5 - 8.25	1.333	-1.549	-2.809	-0.195	-0.702
8.25 - 9	1.333	2.775	-2.809	-0.195	-0.702
9 - 10.5	3.303	3.347	-3.082	-0.156	-2.731
10.5 - 12	3.798	2.991	-2.575	-1.181	-1.756
12 - 13.5	2.757	2.913	-3.434	-0.667	-0.351
13.5 - 15	4.162	2.934	-3.160	-2.444	-0.351
15 - 16.5	7.114	3.237	-3.941	-2.926	-2.146
16.5 - 17.25	4.214	3.029	-0.624	-3.160	-4.292
17.25 - 18	4.214	3.029	1.942	-3.160	-4.292
18 - 19.5	0.325	2.142	2.931	-6.136	-2.575
19.5 - 21	1.405	2.718	3.629	-1.333	-3.785
21 - 22.5	0.286	0.169	2.458	-1.271	-7.374
22.5 - 24	0.598	1.295	2.731	-2.263	-1.405
24 - 25.5	0.234	0.532	2.965	-3.707	-1.600
25.5 - 26.25	0.605	0.936	3.278	-2.185	-0.780
26.25 - 27	0.605	0.936	3.278	0.780	-0.780
27 - 28.5	0.761	1.438	3.082	3.785	-1.327
28.5 - 30	0.644	0.117	2.302	1.834	-2.029
30 - 31.5	0.410	0.000	0.780	2.146	-1.912
31.5 - 33	0.410	0.078	1.249	1.834	-2.380
33 - 34.5	0.410	0.351	1.210	1.834	-3.629
34.5 - 35.25					-0.936



Gráficos de velocidades sondeo tres por fuentes sísmicas realizadas. a) Fuente sísmica artificial -0.75m, Fuente sísmica artificial 8.25m, Fuente sísmica artificial 17.25m, Fuente sísmica artificial 26.25m, Fuente sísmica artificial 35.25m