

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE
SUBSIDENCIA EN EMPALME, SONORA,
MÉXICO.**

TESIS

**Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.**



PRESENTA:

CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ.

Hermosillo, Sonora, Diciembre del 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Departamento de Geología
División de Ciencias Exactas y Naturales

F01

Hermosillo, Sonora, a 20 de Septiembre del 2018

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para su aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**"EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE SUBSIDENCIA EN EMPALME,
SONORA, MÉXICO"**

Esto es con el fin de que la alumna **CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ**, pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Grado de la Maestría en Ciencias-Geología.

Sin otro en particular quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega

Director de Tesis

MC José Ismael Minjarez Sosa

Co-Director de Tesis

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo





"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA F02

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 29 de noviembre de 2018

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Director de Tesis
M.C. José Ismael Minjarez Sosa
Co-Director de Tesis

Por este conducto les comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Ustedes, intitulado:

"EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE SUBSIDENCIA EN EMPALME, SONORA, MÉXICO"

Esto, con el fin de que la alumna **CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ** pueda presentar su examen profesional, para la obtención del título de Grado. Asimismo les comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

M.C. Margarita de la O Villanueva	Presidente
M.C. Javier Valencia Saucedo	Secretario
M.C. Alberto Villa Terán	Vocal (Sinodal Externo)
M.C. José Ismael Minjarez Sosa	Vocal
Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega	Vocal

Sin otro en particular quedo de Ustedes

Atentamente

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesada
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

F06

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**"EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE SUBSIDENCIA EN EMPALME,
SONORA, MÉXICO"**

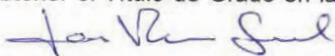
NOMBRE DE LA SUSTENTANTE:

CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ

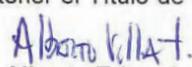
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. Margarita de la O Villanueva

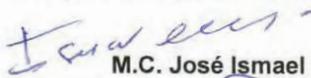
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. Javier Valencia Saucedo

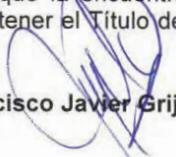
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. Alberto Eduardo Villa Terán

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


M.C. José Ismael Minjarez Sosa

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Grado en la Universidad de Sonora.


Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega

Atentamente


Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

Campus Universitario, Edif. 3/C, Hermosillo, Sonora. C.P. 83000
Tel. (662) 259-21-10, ext. 8110, Tel. Fax: (662) 259-21 11. Portal web: www.geologia.uson.mx



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

F07

Hermosillo, Sonora, a 5 de diciembre de 2018

Dr. Jesús Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología
Departamento de Geología

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que después de revisar y aprobar el trabajo de tesis de la alumna **CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ**, hemos acordado que la presentación del examen de grado de la alumna se lleve a cabo el día viernes 14 de diciembre del presente a las 17:00 horas.

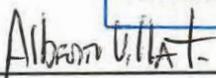
Sin otro particular, quedamos a la espera de su respuesta.

ATENTAMENTE
Comité de Tesis

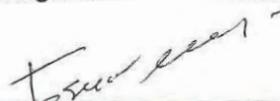




MC Margarita de la O Villanueva



MC Alberto Villa Terán



MC José Ismael Minjarez Sosa
Co-Director de Tesis



Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Director de Tesis

MC Javier Valencia Saucedo

C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA F08

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora a 11 de diciembre de 2018

Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega
Director de Tesis
M.C. José Ismael Minjarez Sosa
Co-Director de Tesis

Por este conducto y en atención a la solicitud recibida el día de 10 de diciembre del presente, les comunico que ha sido aprobada la fecha para la presentación de Examen de Grado de la alumna **CLAUDIA MORALES HERNÁNDEZ** propuesta por el Comité de Tesis.

Dicho examen se llevará a cabo el día **viernes 14 de diciembre del presente a las 17:00 horas** en el *Auditorio del Departamento de Investigación en Física (DIFUS)*.

Sin otro en particular quedo de Ustedes

Atentamente



Dr. Jesús Roberto Vidal Solano
Coordinador de Programa
Maestría en Ciencias-Geología



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**MAESTRIA EN
CIENCIAS
GEOLOGIA
DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo

Dedicatoria

*A todas aquellas mujeres
(madre, hermana, tía, amigas)
que me han enseñado a lo largo
de mi vida a no rendirme nunca,
a luchar por lo que quiero
y a dar lo mejor de mí misma.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme permitido cumplir una meta más y tan importante en mi vida.

Agradezco el apoyo brindado al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) como Becario No. 785050, por otorgarme la beca de la Convocatoria 291137, durante el periodo de agosto del 2016 a julio del 2018.

A mi familia por el apoyo incondicional y moral que me brindaron en este tiempo para poder culminar esta etapa de mi vida, en especial, a mi hermana Luz María Hernández.

A mi Comité de Tutores por todos sus comentarios y observaciones, los cuales sirvieron para la mejora de este trabajo; así como su disposición y tiempo dedicado. En especial a la M.C. Margarita de la O por todo el apoyo que me brindó, por su paciencia y por todos los consejos y puntos de vista que me dio para la elaboración de esta tesis.

A mis compañeras y compañeros que me acompañaron a las salidas a campo para el levantamiento de datos estructurales y geofísicos: M.C.G. Alba Lucina Martínez Haros, Fernanda Sarabia, Ximena Palafox e Isai Castillón; y en especial al M.C.G. Javier Valencia Saucedo por su apoyo en el tema de Geofísica.

Asimismo, un agradecimiento muy especial a la M.C.G. Alba Lucina Martínez Haros por todo su apoyo, paciencia y comentarios para el mejoramiento de las imágenes de esta tesis. Al igual que a la M.C.G. Grisél Gutiérrez Anguamea.

Y, por último, a mi amiga Ana Machichi Serrano por permitirle a su hijo Devin acompañarme en uno de mis viajes para hacerme compañía y no ir sola; y a Ana Sofía García Yeomans quien me ayudó con tips para la edición de este documento.

Gracias a todos y a todas.

RESUMEN

En varias partes del mundo se han observado hundimientos, tanto lentos (subsistencia) como repentinos (colapso) y agrietamientos en los depósitos recientes, siendo este proceso cada vez más palpable en el medio urbano, con lo que se ha convertido en un importante caso de estudio para mucho. En México se ha presentado el problema de hundimientos en diferentes ciudades, generalmente como consecuencia de la extracción del agua de los mantos acuíferos y, en forma más frecuente, en zonas semidesérticas. En la Ciudad de Empalme, Sonora, se han reportado algunos hundimientos (colapsos) en varias notas periodísticas.

El presente trabajo se llevó a cabo en la Ciudad de Empalme, Sonora, en donde se realizaron un total de 6 visitas al área de estudio, de las cuales 5 fueron para el levantamiento de datos estructurales, donde se obtuvieron un total de 39 puntos de información para conocer con detalle la distribución y características del fracturamiento, identificándose 23 fallas o fracturas en la parte norte de Empalme; y una para el levantamiento geofísico, donde se realizaron 3 secciones para dicho estudio.

En el Mapa de Sismos para el suroeste del Estado de Sonora, se observa que existen dos grupos de concentración de epicentros: uno hacia el SW de la Ciudad de Empalme, con una orientación NW-SE, concordando con las fallas principales del Golfo de California, y el otro hacia el SE de Empalme, con una dirección NE-SW. Para la realización de los Mapas de Propagación de Onda Sísmica (PGA) se tomaron como ejemplos 6 magnitudes para una distancia de 0 km a 100 km desde Empalme, obteniendo como resultado rangos de intensidad que varían entre I y V en la escala de Mercalli, pudiéndose considerar a esta región con un grado de susceptibilidad que va desde muy débil a poco fuerte (o moderado en la escala de Richter).

Los daños que presenta la parte norte de Empalme son: en las viviendas, fracturamientos en cimentaciones, dadas (vigas de amarre), muros de carga columnas, paredes, techos, bardas y pisos; en la vialidad, calles, avenidas y banquetas; y en el Panteón Municipal. Estos daños van desde susceptibilidad moderada hasta susceptibilidad severa, generándose un Mapa de Riesgo con tres zonas de riesgo: severo, alto y moderado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. Antecedentes.....	20
1.2. Objetivos	23
1.3. Localización del Área de Estudio	23
1.4. Metodología.....	25
2. MARCO GEOLÓGICO TECTÓNICO	28
2.1. Fisiografía.....	28
2.2. Geología Regional.....	33
2.3. Geología Estructural Regional	41
3. RESULTADOS	47
3.1. Análisis Sismológico	47
3.2. Análisis de Geología Estructural Local.....	60
3.3. Análisis de Tomografía Eléctrica de Resistividad.....	67
3.4. Análisis Estructural de Edificios	84
3.5. Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia	94
3.6. Determinación Zona de Riesgo.....	107
4. DISCUSIÓN	114
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
5.1. Conclusiones.....	120
5.2. Recomendaciones.....	122
8. BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hundimiento en Empalme, Sonora, el día 11 de mayo del 2015 (Mega Noticias, recuperado de: https://meganoticias.mx/tu-ciudad/guaymas/ultimo-minuto/item/78490-se-hunden-calles-de-empalme.html).	22
Figura 2. Hundimiento en Empalme, Sonora, el 21 de septiembre del 2015 (FM105, recuperado de: http://www.fm105.com.mx/noticias/local/notalocal.php?dID=665725650).	22
Figura 3. Localización del área de estudio.....	24
Figura 4. Proceso metodológico.....	26
Figura 5. Provincias fisiográficas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).....	30

Figura 6. Subprovincias fisiográficas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).....	31
Figura 7. Sistema de topoformas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).	32
Figura 8. Mapa geológico regional del área de estudio (modificado de INEGI, 2002, escala 1:1,000,000 y de Mora <i>et al.</i> , 2004).	34
Figura 9. Mapa del NW de México mostrando la Provincia de Cuencas y Sierras en Sonora y la Provincia Extensional del Golfo (PEG) en las costas del Golfo de California (modificado de Stock y Hodges, 1989); también se muestra la localización general del área de estudio.....	43
Figura 10. Mapa tectónico regional del área de estudio.....	46
Figura 11. Regiones sísmicas de la República Mexicana. Zona A: Escasa actividad sísmica y de baja magnitud; Zonas B y C: zonas de intensidad intermedia con sismos pocos frecuentes; Zona D: sismos muy frecuentes donde han ocurrido los de mayor magnitud y generando daños (figura tomada del Pérez <i>et al.</i> , 2015).	48
Figura 12. Mapa de sismos en el SW del Estado de Sonora donde se muestran los focos de los mismos en un radio de 50 y 100 km a partir de Empalme.	52
Figura 13. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 2.6.	56
Figura 14. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 3.0.	57
Figura 15. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 4.5.	58
Figura 16. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 5.7.	59
Figura 17. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 4.7.	61
Figura 18. Mapa estructural regional de los valles de San José de Guaymas y de Empalme (adaptado de Roldán <i>et al.</i> , 2004, y de Vega <i>et al.</i> , 2004).	64
Figura 19. Gráfica mostrando las direcciones preferenciales del grupo de fallas normales con rumbos NNE-SSW.	65
Figura 20. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales del grupo de fallas de deslizamiento lateral.	66
Figura 21. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales del grupo de fracturas.	67
Figura 22. Electrodo inteligente y cable con conectores integrados con una separación entre dichos electrodos de 5 m cada uno.	69

Figura 23. Equipo que se utilizó para el envío y recepción de energía eléctrica para la medición de los cambios de resistividad en el subsuelo: resistivímetro (derecha) y laptop (izquierda).	70
Figura 24. Equipo fuente de alimentación de todo el sistema.....	70
Figura 25. Base de la Estación Total del GPS (derecha) y el radio (izquierda).....	71
Figura 26. Equipo Colectora.....	71
Figura 27. Levantamiento geofísico (tomografía eléctrica de resistividad) en la parte norte de Empalme, Sonora, donde se realizaron 3 perfiles: Perfil 1 = Panteón Municipal; Perfil 2 = Calle Guillermo Prieto, entre la Avenida Francisco Villa y callejón sin nombre; y Perfil 3 = Avenida Vicente Guerrero, entre las calles Miguel Hidalgo y Gómez Farías.	73
Figura 28. Perfil 1: Panteón Municipal, con vista hacia el este, con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 200 m, aproximadamente.....	74
Figura 29. Perfil 2: Calle Guillermo Prieto, con vista hacia el sur (lado izquierdo) y norte (lado derecho), con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 200 m, aproximadamente.....	74
Figura 30. Perfil 3: Avenida Vicente Guerrero, con vista hacia el oeste, con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 250 m, aproximadamente.....	75
Figura 31. Tomografía de la pseudosección del Perfil 1 con arreglo Wenner. a) Arriba: pseudosección con los puntos medidos (o pseudosección de resistividades aparentes); b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) abajo: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.	78
Figura 32. Tomografía de la pseudosección del Perfil 2 con arreglo Wenner. a) Superior: pseudosección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) inferior: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.....	78
Figura 33. Tomografía de la pseudosección del Perfil 3 con arreglo Wenner. a) Superior: pseudosección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) inferior: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.....	79
Figura 34. Tomografía de la pseudosección del Perfil 3 con arreglo Schlumberger. a) Arriba: pseudosección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) abajo: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.....	79

Figura 35. Modelo de resistividad del Perfil 1: Panteón Municipal. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. Las líneas rojas (A, B) indican los planos de falla interpretados en este trabajo.....	80
Figura 36. Falla B en superficie afectando tumbas. Nótese el fracturamiento que presenta una de las tumbas (líneas rojas).	80
Figura 37. Falla A en superficie afectando tumbas. Nótese el fracturamiento que presenta una de las tumbas (líneas rojas).	81
Figura 38. Modelo de resistividad del Perfil 2: Calle Guillermo Prieto. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. La línea roja segmentada (A), para este caso, pudiera ser un plano de falla sin reflejarse en la superficie. ...	81
Figura 39. Falla en superficie afectando a la infraestructura del área. Obsérvese el fracturamiento sobre la calle (líneas rojas).	82
Figura 40. Modelo de resistividad del Perfil 3: Avenida Vicente Guerrero. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. Las líneas rojas segmentadas (A, B) muestra los planos de falla interpretados en este trabajo. La línea roja segmentada (C), para este caso, pudiera ser un plano de falla sin reflejarse en la superficie. ...	83
Figura 41. Falla en superficie afectando a la infraestructura del área (Falla A). Nótese el fracturamiento sobre la banqueta y la barda de la escuela (líneas rojas).	83
Figura 42. Punto MC001, de coordenadas UTM 3094469N, 518319E, ubicado sobre la Avenida Vicente Guerrero esquina con Callejón Ignacio Allende, de la Colonia Juárez, donde se puede observar fracturamiento en la pared de la casa (líneas rojas).....	85
Figura 43. Punto MC001, de coordenadas UTM 3094469N, 518319E, ubicado sobre la Avenida Vicente Guerrero esquina con Callejón Ignacio Allende, de la Colonia Juárez, donde se observa daño tanto a la cimentación de la casa como de la barda y en la columna de esta última (líneas rojas).	85
Figura 44. Punto MC003, de coordenadas UTM 3094000N, 518483E, ubicado sobre la Calle Guillermo Prieto, entre Avenida Emiliano Zapata y Avenida Francisco I. Madero, de la Colonia Juárez, donde se observaron cuarteaduras en la pared de la vivienda (líneas rojas). También se puede observar que ya le realizaron reparaciones a la misma en la parte más afectada (polígono verde).	86
Figura 45. Punto MC033, de coordenadas UTM 3093449N, 518914E, ubicado sobre la Calle 4, entre la Avenida Quinta y Avenida de las Américas, Colonia Centro, donde se pueden ver fracturamientos en las paredes frontales de la vivienda (líneas rojas), así como reparaciones que ya le han hecho a las mismas y vueltas a cuartearse (áreas grises).	86

Figura 46. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se encuentra casa abandonada debido a que está muy afectada por el fracturamiento (líneas rojas) que existe en la zona (parte externa de la casa).	87
Figura 47. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se observan fracturamientos en las paredes y dalas (líneas rojas) en la parte interna de la casa abandonada. a) Cocina; b) sala.	87
Figura 48. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, ubicado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se puede ver fracturamiento (líneas rojas) en las paredes de la casa abandonada (recámara).....	88
Figura 49. Punto MC009, de coordenadas UTM 3094522N, 519037E, localizado en el Panteón Municipal, donde se observa afectación en tumbas debido al fracturamiento de la zona, con un rumbo de 32° NE (líneas rojas).	88
Figura 50. Punto MC010, de coordenadas UTM 3094419N, 519044E, posicionado en el Panteón Municipal, donde se pueden ver cuarteaduras en la tumba y el rompimiento que ya tiene el brazo de la cruz de cemento (líneas rojas).....	89
Figura 51. a) Punto MC005, de coordenadas UTM 3094507N, 519126E, localizado en el Panteón Municipal, donde se observa tumba inclinada (hundimiento), con rumbo N 84° W, echado de 4° al NE y un desnivel de 60 cm. b) Punto MC006, de coordenadas UTM 3094512N, 519115E, ubicado en el Panteón Municipal, donde se observa la segunda tumba inclinada (hundimiento), con rumbo N 83° W, echado de 6° al NE y desnivel de 40 cm.	89
Figura 52. a) Punto MC007, de coordenadas UTM 3094516N, 519107E, localizado en el Panteón Municipal, donde se ve la tercera tumba con inclinación (hundimiento), de rumbo N 83° W, echado de 5° al NE y desnivel de 17 cm. b) Punto MC008, de coordenadas UTM 3094519N, 519078E, posicionado en el Panteón Municipal, donde se encuentra la cuarta tumba con inclinación (hundimiento) de rumbo E-W, echado hacia el norte y desnivel de 55 cm.	90
Figura 53. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, Colonia Juárez, observándose fracturamiento (líneas rojas) en el traben que separa la cocina de la sala.	90
Figura 54. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, de la Colonia Juárez, notándose cuarteaduras (línea roja) e infiltración (polígono azul) en el techo de la vivienda.	91

Figura 55. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento (línea roja) en la pared que separa la sala de la calle.	91
Figura 56. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, localizado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, de la Colonia Juárez, donde se observa desnivel en la puerta principal (líneas azules), la cual fue clausurada por las constantes reparaciones y el costo que conlleva.	92
Figura 57. Punto MC030, de coordenadas UTM 3094464N, 518457E, localizado en la Calle Guillermo Prieto esquina con Avenida Vicente Guerrero, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento (líneas rojas) en una de las columnas de la vivienda.	92
Figura 58. Punto MC028, de coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento en la banqueta y barda de la escuela secundaria. a) Separación de la barda de 1 cm en la parte inferior hasta 6 cm en la parte superior; b) fracturamiento en la banqueta (líneas rojas).	93
Figura 59. Punto MC028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento en la vía de comunicación, guarnición y barda de la escuela (líneas rojas).	93
Figura 60. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales de las fallas encontradas en la parte norte de Empalme, Sonora.	94
Figura 61. Geoposicionamiento de los puntos levantados en campo (datos estructurales) en la zona de estudio.	95
Figura 62. Geoposicionamiento de los puntos levantados en campo (datos estructurales), así como de la dirección de las fallas encontradas en la zona de estudio.	96
Figura 63. Mapa de subsidencia de subsidencia mostrando las zonas con daño severo (anaranjado), alto (amarillo) y moderado (verde) en la parte norte de Empalme, Sonora (polígonos naranjas).	101
Figura 64. Punto MC-028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, en donde se puede observar la separación del muro desde 1 cm en la parte inferior hasta 6 cm en la parte superior.	102
Figura 65. Punto MC-028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, ubicado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento desde la vialidad, guarnición, banqueta, hasta la barda de la escuela.	103

Figura 66. Punto MC-002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se encuentra casa abandonada debido a que está muy afectada por el fracturamiento que existe en la zona.	103
Figura 67. Casa localizada en la Calle Ignacio Ramírez, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, Colonia Juárez, donde se puede ver: (a) agrietamiento casi vertical (línea roja) en la parte superior de la barda o muro de separación, con separación de 1 cm o mayor y desprendimientos de fragmentos (polígonos verdes), así como alejamiento de la barda de colindancia con el poste desde 4-5 cm en la base hasta 15 cm en la parte superior.	104
Figura 68. a) Punto MC-021, coordenadas UTM 3094599N y 517931E, ubicado sobre la Calle Benito Juárez García, entre Avenida Vicente Guerrero y Camino a San José de Guaymas, Colonia Moderna Norte, donde se presenta un agrietamiento vertical (línea roja), dañando tanto a pared como al techo y, probablemente, a cimientos. Nótese desprendimiento de fragmentos en la parte inferior de la pared, sobre la zona gris. b) Punto MC-013, coordenadas UTM 3094671N y 518441E, ubicado sobre la Calle Ignacio Ramírez final, en la Colonia Juárez, donde se observa agrietamiento tanto diagonal como horizontal, vertical y diagonal escalonado (líneas rojas), así como desprendimiento de fragmentos (polígono verde) en la esquina inferior derecha de la casa.	104
Figura 69. a) Punto MC-023, coordenadas UTM 3094466N y 518269E, ubicado en la Calle Miguel Hidalgo y Costilla esquina con Avenida Vicente Guerrero, entre Avenida Francisco Villa y Calle Mariano Abasolo y Callejón Ignacio Allende, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento vertical (líneas rojas) en una de las columnas de la barda. b) Casa localizada en Ignacio Ramírez esquina con calle sin nombre, Colonia Juárez, donde se observa agrietamiento horizontal y vertical, en este último, con algunas aberturas de más o menos 1 cm o más y desprendimiento de fragmentos.	105
Figura 70. Punto MC-012, coordenadas UTM 3094566N y 518389E, localizado en la Calle Guadalupe Victoria, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, Colonia Juárez, observándose fracturamiento horizontal y diagonal (líneas rojas) y con desprendimientos de pequeños fragmentos.	105
Figura 71. Casa localizada sobre la Calle Guadalupe Victoria, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, de la Colonia Juárez, donde se puede ver fracturamiento diagonal (línea roja) en la esquina inferior derecha de la casa.	106
Figura 72. Punto MC-033, de coordenadas UTM 3093449N, 518914E, ubicado sobre la Calle 4, entre la Avenida Quinta y Avenida de las Américas, Colonia Centro, donde se pueden ver	

fracturamientos en las paredes frontales de la vivienda, de tipo diagonal escalonado, horizontal, vertical y diagonal, así como reparaciones que ya le han hecho a las mismas y vueltas a cuartearse (áreas grises).....	106
Figura 73. Punto MC-034, de coordenadas UTM 3093473N y 519019E, ubicado en la Avenida Quinta esquina con calle sin nombre, de la Colonia Centro, donde podemos observar fracturamiento principalmente diagonal con algunos desprendimientos pequeños de fragmentos cerca de la ventana derecha.	107
Figura 74. Diagrama de flujo de los fenómenos geológicos que tienen una concatenación, donde los sismos generan fallas y éstas, a su vez, originan subsidencia.	108
Figura 75. Funciones de las aceleraciones horizontales del suelo (PGA) contra el índice de daño (ID), donde se pueden observar las curvas de daño de forma trilineal y el aumento de daño de 0 a 0.8.	110
Figura 76. Mapa de Riesgo por Subsidencia producida por sismo en la parte norte de Empalme, Sonora.	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de magnitudes de sismos de la Zona 1 cercana al área de estudio.....	53
Tabla 2. Variaciones de PGA conforme a las distancias epicentrales de los sismos.	54
Tabla 3. Tabla de intensidades para las diferentes magnitudes en la Zona 1, cercana al área de estudio, modificada de Mercalli y PGA.	55
Tabla 4. Tabla de Intensidades de Mercalli cercana al área de estudio.	55
Tabla 5. Tabla de variaciones de PGA y de intensidades de Mercalli para un sismo de 4.7 cercano al área de estudio.	60
Tabla 6. Resistividades de los diferentes tipos de terreno.	68
Tabla 7. Valores de daños asociados a subsidencia (Julio <i>et al.</i> , 2012).	100
Tabla 8. Caracterización del daño para el Estado de Daño e Índice de Daño de Park <i>et al.</i> (1993) (modificada de: Park <i>et al.</i> , 1993, <i>in</i> Reyes <i>et al.</i> , <i>s/f</i> , y EERI, 1996, <i>in</i> Cano <i>et al.</i> , <i>s/f</i>).	109
Tabla 9. Índice de daño contra las variaciones de aceleración (PGA) a diferentes distancias epicentrales y distintos sismos.	110
Tabla 10. Tabla de correlaciones de intensidades de Mercalli con valores de aceleración pico del terreno (PGA) y la velocidad pico de tierra (PGV) (tomada de Worden <i>et al.</i> , 2012).	111

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos geológicos son manifestaciones naturales recurrentes que tienen su origen en la dinámica interna y externa de la tierra. Estas manifestaciones naturales son inevitables, por lo que es importante aprender a convivir con ellas; sin embargo, es necesario minimizar los efectos en la ocurrencia de estos eventos y, en algunos casos, evitar el daño a las vidas humanas, sus bienes y su entorno.

Una de estas manifestaciones o fenómenos naturales es la subsidencia, la cual es, de acuerdo con INEGI (2014), un hundimiento paulatino de la superficie de la corteza terrestre, debido a factores que pueden ser naturales o antrópicos, mientras que el colapso es un hundimiento súbito de la superficie de la corteza terrestre, debido también a factores que pueden ser naturales o antrópicos (INEGI, 2014).

Para Arzate *et al.* (2006), la subsidencia es el fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos o fluidos del subsuelo, que se manifiesta en la compactación paulatina o súbita de la masa de suelo.

En varias partes del mundo se han observado hundimientos y fracturamientos en los depósitos recientes. Este fenómeno es producto de una o la combinación de dos de las siguientes causas:

- Existen evidencias que indican que los agrietamientos se desarrollan comúnmente sobre estructuras geológicas sepultadas por capas de sedimentos (p.e., Jachens y Holzer, 1979; Rojas *et al.*, 2002; entre otros), donde la identificación de las irregularidades del lecho rocoso es, por lo tanto, clave para la ubicación de zonas potencialmente propicias al fallamiento del suelo, deduciendo con esto que tanto la configuración geométrica del lecho rocoso como su localización a profundidad son factores importantes para evaluar la distribución y magnitud de las deformaciones en masa de suelo sobre la cual se asientan los desarrollos urbanos. Por su parte, Ivanich *et al.* (2003), en un estudio realizado sobre un agrietamiento en Arizona, al generar un mapa de contornos, observaron que las isolíneas de la anomalía gravimétrica seguían la misma dirección del agrietamiento; y al combinar este mapa con un interferograma que realizaron en la

misma zona, concluyeron que la subsidencia y los agrietamientos son controlados por estructuras geológicas sepultadas.

- La sobreexplotación de aguas subterráneas que, en muchos de los casos, genera la subsidencia, la cual es provocada por el aprovechamiento y extracción indiscriminada de dichas aguas, generando una compactación de los sedimentos y formando hundimientos diferenciales que dan lugar a la aparición de fallas geológicas activas (Trujillo, 2009; Rodríguez y Rodríguez, 2006; entre otros). Por otro lado, Burbey (2002) describió un escenario en donde se pueden originar fallamientos y hace un análisis numérico de su comportamiento ante un descenso en el nivel piezométrico. El escenario consiste en un acuífero con fallas preexistentes en los materiales granulares. En la simulación que hizo, las fallas funcionan como discontinuidades al flujo horizontal, provocando un abatimiento no uniforme del nivel de agua subterránea y, por consiguiente, generando hundimientos diferenciales y un fallamiento en la superficie.
- Peng *et al.* (2016), en una investigación sobre el hundimiento que existe en la Ciudad de Xi'an, China, mencionan la relación que hay entre la extracción de agua subterránea y la reactivación de fallas normales preexistentes. Ellos comentan que la extracción de agua subterránea a gran escala y por periodos largos ha causado subsidencia y disparado la reactivación de fallas normales preexistentes (o activas) en el Cuaternario bajo los sedimentos consolidados en el subsuelo de la ciudad, llevando esto a la ruptura del suelo que gradualmente ha evolucionado a zonas con fracturamiento terrestre, donde durante este proceso existe una relación directa entre subsidencia y la formación de dicho fracturamiento.
- Desde la década de 1920, abundantes fracturamientos sobre el suelo fueron encontrados en valles tectónicos en el suroeste de Estados Unidos, como, por ejemplo, Arizona, California y Nevada (Galloway *et al.*, 1999). Basados en esta evidencia en que estos valles estaban experimentando movimientos fuertes de neotectónica, algunos investigadores propusieron un mecanismo (o movimiento) de origen tectónico para la formación de fracturamiento en el suelo (Leonard, 1929). Posteriormente, se observó que este tipo de fracturamiento generalmente ocurría en áreas áridas o semi-áridas. La explotación en periodos prolongados del agua subterránea en estas zonas conduce a una disminución extendida en el nivel del agua subterránea, siendo acompañada de subsidencia (Peng *et al.*, 2016).

Varios autores (e.g., Trujillo, 2009; Mejía *et al.*, s/f; Pacheco, 2007; entre otros), sugieren que este tipo de hundimiento para México se atribuye a la excesiva extracción de agua subterránea en zonas geológicas dominadas por sedimentos no consolidados y compresibles. Muy pocos autores lo atribuyen al efecto de fallamiento activo o a la combinación de ambos (INEGI, 2014; Peng *et al.*, 2016).

Además de los hundimientos, se presenta un fenómeno mucho más espectacular y destructivo: la aparición de fracturas y fallas superficiales en los depósitos recientes, los cuales afectan todo tipo de infraestructura, como edificios públicos y privados, pavimento de calles, banquetas, tuberías de agua potable, drenaje, gas, etcétera (INEGI, 2014; Pacheco, 2007; Herrera, 2012; Peng *et al.*, 2016; entre otros).

Este proceso es cada vez más palpable en el medio urbano, con lo que se ha convertido en un importante caso de estudio para muchos, ya sea por las actividades de la zona (agrícola) o por sus características geohidrológicas, entrando en proceso irreversible de compactación hasta su nuevo equilibrio por la recarga natural, la suspensión de la explotación, o por las medidas de mitigación. Esto pudiera verse acelerado por un entorno regional tectónicamente activo.

1.1. Antecedentes

En varias partes del mundo se han observado hundimientos, tanto lentos (subsistencia) como repentinos (colapso) y agrietamientos en los depósitos recientes, como, por ejemplo:

- Fukuoka, Japón, el 7 de noviembre del 2016, donde se hundió, en la zona centro de la ciudad, un cruce entre 2 importantes avenidas, frente a la Estación Ferroviaria de Hakata, con un diámetro de 300 m² (20 m de ancho por 15 m de largo, aproximadamente), provocando cortes de tráfico y luz, y obligó a las autoridades a evacuar los alrededores, ya que temían que el agujero se agrandara y afectara a edificios y estructuras colindantes. Este agujero comenzó a llenarse de agua procedente de canalizaciones subterráneas (recuperado del Diario 24 Horas del 7 de noviembre del 2016 de: <http://www.24-horas.mx/se-abre-la-tierra-en-japon-hundimiento-supera-los-300-metros-cuadrados-fotos/>).

- Henan, China, donde se abrió un socavón el 23 de agosto del 2016, con un diámetro de 20 m de ancho, 30 m de largo y 9 m de profundidad, cayendo 3 personas en él (recuperado de YouTube del 23 de agosto del 2016, titulado: Se Abre La Tierra En China, de: <https://www.youtube.com/watch?vkS3urYWy9WI>).
- Florencia, Italia, donde se hundieron 200 m de carretera el día 25 de mayo del 2016, afectando a más de 20 vehículos que estaban estacionados en la zona (recuperado del Diario La Nueva España del 25 de mayo del 2016, de: <http://prodigy.msn.com/es-mx/video/watch/se-hunden-200-metros-de-carretera-en-florencia/vi-BBttBBe?ocid=VMSNNMX7>).

México no es la excepción y se han presentado hundimientos y agrietamientos en varias partes de la República, como son los casos de: Aguascalientes, la Ciudad de México, el Bajío Guanajuatense (Celaya, Irapuato, Salamanca, Silao, Abasolo, Pueblo Nuevo), San Luis Potosí, Morelia, Guadalajara, Querétaro, entre otras (INEGI, 2014; Pacheco, 2007; Herrera, 2012; Trujillo, 1985), donde se ha podido observar afectación en todo tipo de infraestructura (calles, banquetas, edificios, sistemas de agua potable y alcantarillado, etcétera), presentándose este fenómeno desde hace más de 20 años. Los autores antes citados mencionan que estos hundimientos generalmente son consecuencia de la extracción del agua de los mantos acuíferos y, en forma más frecuente, en zonas semidesérticas.

En el Estado de Sonora también se han reportado algunas ciudades afectadas por este fenómeno; entre ellas se encuentran: Hermosillo, Ciudad Obregón, Navojoa, Empalme, entre otras.

En Empalme, Sonora, se han reportado algunos hundimientos (colapsos) en varias notas periodísticas; como, por ejemplo: Mega Noticias, el 11 de mayo del 2015 (**Figura 1**); y FM105, el 21 de septiembre del 2015 (**Figura 2**).

En esta localidad se ha observado una gran cantidad de fracturamientos afectando a la infraestructura del lugar, como, por ejemplo, casas, escuela, calles, banquetas, así como al Panteón Municipal, etcétera; es por ello importante analizar qué fenómeno los produce, así como el grado de peligro natural o antropogénico que presenta.



Figura 1. Hundimiento en Empalme, Sonora, el día 11 de mayo del 2015 (Mega Noticias, recuperado de: <https://meganoticias.mx/tu-ciudad/guaymas/ultimo-minuto/item/78490-se-hunden-calles-de-empalme.html>).



Figura 2. Hundimiento en Empalme, Sonora, el 21 de septiembre del 2015 (FM105, recuperado de: <http://www.fm105.com.mx/noticias/local/notalocal.php?dID=665725650>).

1.2. Objetivos

1.3.1. Objetivo General:

Estudiar el fenómeno de subsidencia en la zona de Empalme, Sonora, para definir sus causas y determinar las zonas y el grado de afectación por dicho fenómeno.

1.3.2. Objetivos Particulares:

1. Identificar los elementos estructurales a través de las diferentes imágenes satelitales.
2. Llevar a cabo la evaluación de los datos estructurales levantados en campo.
3. Llevar a cabo la evaluación de los datos de los daños estructurales en la infraestructura urbana levantados en campo.
4. Realizar un estudio geofísico (tomografía eléctrica resistiva).
5. Determinar los elementos de carácter natural o antrópico que actúan como detonantes del fenómeno en el terreno, así como sus características naturales del mismo y que favorece el desarrollo de la subsidencia.
6. Generar un mapa de zonificación de riesgo, utilizando herramientas SIG.

1.3. Localización del Área de Estudio

La Población de Empalme se ubica en la porción suroeste del Estado de Sonora (**Figura 3**), en el municipio del mismo nombre, entre los valles de Hermosillo y Cajeme, circundando por el Municipio de Guaymas y por el Golfo de California o Mar de Cortés. Se encuentra limitado: al norte, por terrenos agrícolas del Municipio de Guaymas; al sur, por las aguas del Golfo; al este, por terrenos de la Comunidad Yaqui, Municipio de Guaymas; y al oeste, por el Estero del Sahueso, la Laguna del Rancho y la Sierra de Santa Úrsula o Venada.

Las coordenadas geográficas de la localidad son: 27°55'28" de latitud norte y 110°47'30" de longitud oeste, de acuerdo con el Meridiano de Greenwich, con una altitud de 3.5 msnm.

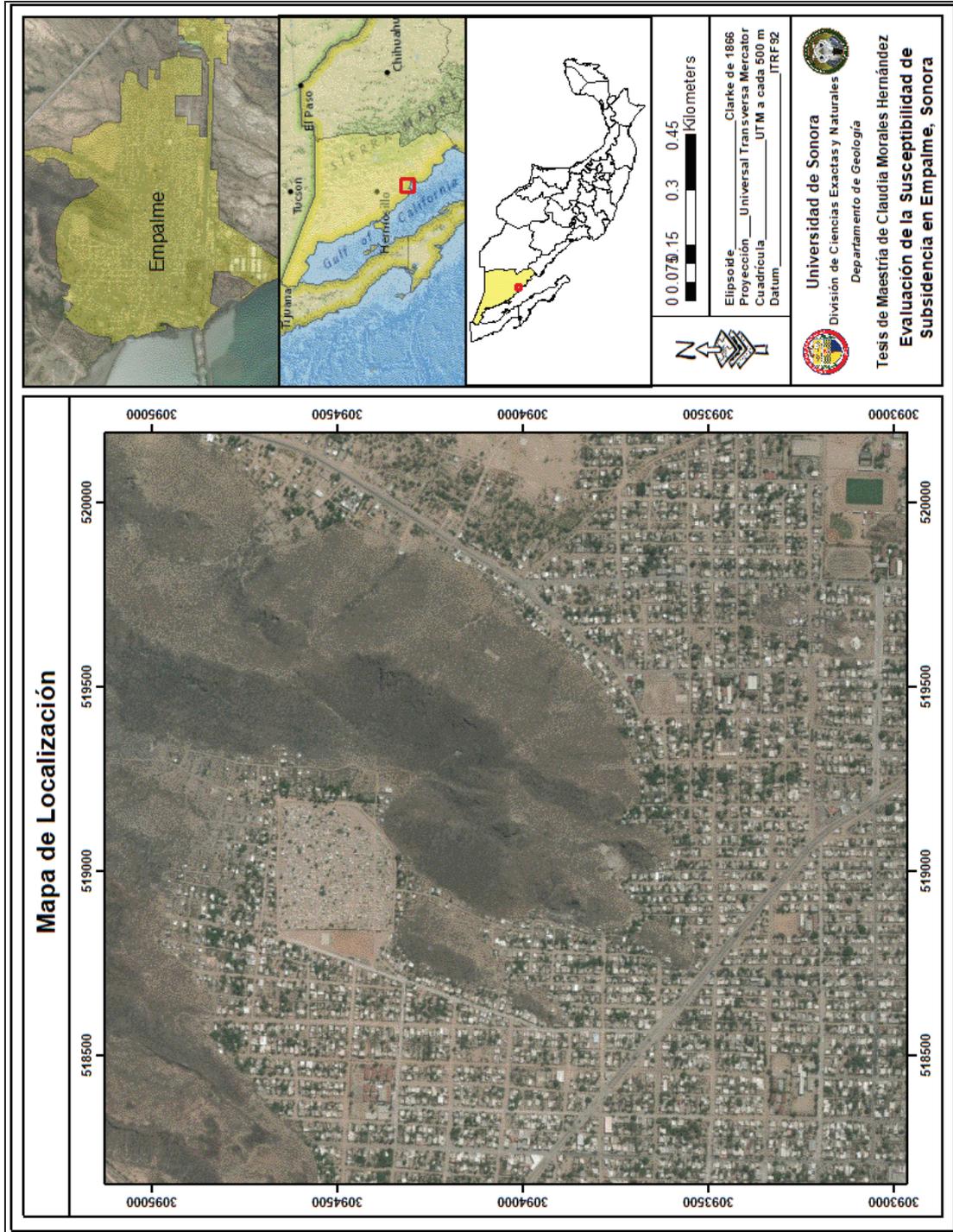


Figura 3. Localización del área de estudio.

Su acceso principal es la Carretera Federal Hermosillo-Guaymas y Guaymas-Ciudad Obregón; y tiene una superficie total de 70,853 has, que representa el 0.38% del total estatal y el 0.04% en relación con el nacional.

1.4. Metodología

El presente trabajo se lleva a cabo a través de algunas etapas, siendo de suma importancia el manejo ordenado de la información para el entendimiento del problema de subsidencia en Empalme, Sonora (*Figura 4*).

1.4.1 Primera Etapa:

Durante esta etapa se llevó a cabo la recopilación de trabajos previos, tanto a nivel mundial como nacional, regional y local, relacionados con el problema de subsidencia en zonas urbanas y su afectación a las mismas; así como con la identificación de los principales factores que inciden en el desarrollo de zonas de subsidencia del terreno.

A nivel local se investigaron, también, los reportes periodísticos sobre hundimientos que se han presentado en la Ciudad de Empalme, Sonora, en los últimos 5 a 10 años.

Además, se obtuvieron ortofotos e imágenes satelitales:

- Landsat
- Spot-6
- Alos Palsar
- Sentinel_2

1.4.2. Segunda Etapa:

Se realiza:

1. Con ayuda de las herramientas SIG, como el Google Earth, los Basemapas del ArcGis, los modelos digitales de elevación (MDE) y las imágenes satelitales (de diferentes años) anteriormente mencionadas, para el análisis de la zona de estudio sobre:

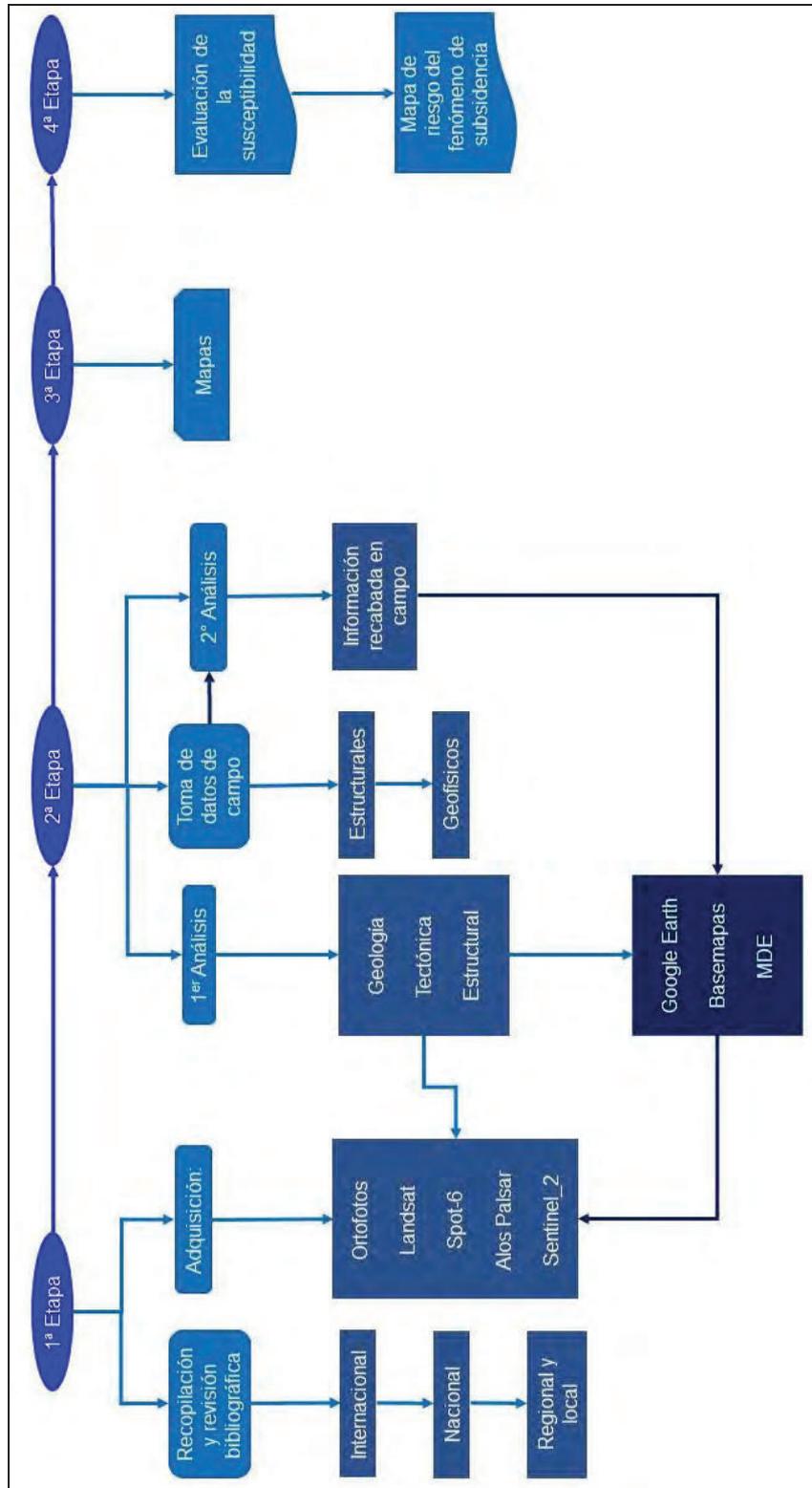


Figura 4. Proceso metodológico.

- La geología regional
- El contexto tectónico regional
- La geología estructural (regional y local)

Con el propósito de visualizar los posibles cambios que pudiera presentar el terreno, así como marcando todos los rasgos lineales observables.

2. Se realizaron los levantamientos detallados de datos de campo sobre el daño estructural en el área urbana (casas, tumbas, bardas, calles, etcétera) y su geoposicionamiento.
3. Se adquirieron, analizaron y modelaron los datos geofísicos (tomografía eléctrica resistiva), tomados en la zona urbana con el propósito de identificar estructuras sepultadas, así como el tipo de material en el subsuelo.
4. Se realizó un segundo análisis estructural con la información levantada en campo y las imágenes obtenidas.

1.4.3. Tercera Etapa:

Durante esta etapa se generaron los diferentes tipos de mapas en función de la información obtenida para este trabajo.

1.4.4. Cuarta Etapa:

Se concluyó con el mapa de riesgo del fenómeno de subsidencia en Empalme, Sonora, y la redacción del presente trabajo de tesis.

2. MARCO GEOLÓGICO TECTÓNICO

2.1. Fisiografía

De acuerdo con la información fisiográfica de INEGI (2002), el área de estudio se encuentra dentro de las provincias fisiográficas Llanura Sonorense y Llanura Costera del Pacífico (**Figura 5**), dentro de las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras Sonorenses y Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa (**Figura 6**), así como de los sistemas de topoformas: Bajada con Lomerío, Sierra Escarpada Compleja, Llanura Deltaica, y Llanura Costera con Ciénegas Salina (**Figura 7**).

La Provincia Fisiográfica **Llanura Sonorense** se localiza al noroeste de México; ocupa la mayor parte del área de estudio y comprende más del 50% de la superficie del estado; se divide en 3 subprovincias: Desierto de Altar, Sierras y Llanuras Sonorenses, y Sierra del Pinacate; consta de sierras bajas paralelas de bloques fallados con una orientación burdamente NNW-SSE, paralelas a la costa y separadas entre sí por grandes bajadas de aluviones y llanuras cada vez más extendidas y bajas hacia la costa. Las laderas de las montañas tienen fuerte pendiente y huellas de erosión. Algunos de los rasgos físicos más importantes son el Desierto de Altar, la Laguna Salada y la Sierra del Pinacate, con una elevación máxima de 1,600 metros.

Limita al norte con Estados Unidos; al este, con la Provincia Sierra Madre Occidental; por el sur, con la Provincia Llanura Costera del Pacífico; al extremo noroeste, con la Provincia Península de Baja California; y al oeste, con el Golfo de California. Dentro de Sonora, presenta una forma de cuña orientada hacia el sur.

Los climas imperantes en la provincia son los muy secos semi-cálidos, como en el Desierto de Altar, y los muy secos cálidos hacia el sur de Hermosillo. En el Desierto de Altar domina la vegetación de desiertos arenosos; en el resto de la región se encuentran matorrales de tipo sarcocaulé, así como matorral desértico micrófilo y mezquital.

La Provincia Fisiográfica **Llanura Costera del Pacífico** se localiza al occidente de México; ocupa una pequeña porción del área de estudio, hacia el ESE de la Ciudad de Empalme; es una de las provincias más pequeñas del país; abarca zonas costeras de Sonora, Sinaloa y

Nayarit; su relieve es plano casi en su totalidad y está constituida, como su nombre lo indica, por una llanura costera angosta y alargada, que cubre una franja de hasta 65 km de anchura, la cual se extiende por el litoral, cubierta en su mayor parte de aluviones depositados por los ríos que bajan al mar desde la Sierra Madre Occidental. Se caracteriza por grandes llanuras de inundación, lagos y pantanos alineados paralelamente a la costa. Los ríos forman deltas en sus desembocaduras, como los de los ríos Yaqui, Fuerte y Grande de Santiago; y hacia la costa se han desarrollado algunas lagunas y albuferas.

Tiene como límites: al norte, con la Provincia Llanura Sonorense; al este, con la Sierra Madre Occidental; al sur, con el Eje Neovolcánico o Sierra Volcánica Transversal; y al oeste, con el Golfo de California. Se divide en 4 subprovincias: Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa, Llanura Costera de Mazatlán, Delta del Río Grande de Santiago, e Insular de las Tres Marías. Se inicia en la parte norte con el delta del Río Yaqui, que forma la barrera sur de la bahía de Guaymas; este delta y el del Fuerte son los más grandes de la costa norte. Hacia el sur se localiza otro gran delta, el del Río Grande de Santiago.

Esta llanura, de hecho, se extiende por debajo de las aguas del Pacífico, para integrar una amplia plataforma continental que ofrece considerables recursos pesqueros a los pobladores de la zona costera. La isobata de los 200 m se encuentra alejada unos 200 km de la costa en casi todo lo largo del litoral, pero frente al delta del Santiago dobla esa distancia y, prácticamente, engloba a las islas Las Tres Marías, que forman parte de esta provincia.

Su clima es uniformemente cálido en toda la región, pero existe una gradación de norte a sur, con respecto a la humedad, que va del seco al subhúmedo con todas las transiciones. La temperatura en toda la costa es de 28.7°C. Las principales actividades de esta región son, además de la agricultura y la ganadería, la explotación de los recursos pesqueros y turísticos del Golfo de California y el Océano Pacífico.

La vegetación dominante es selva baja caducifolia, aunque también ocupa una parte importante el matorral sarcocaulé; sólo en las zonas ribereñas se encuentran manglares, desarrollándose muy particularmente en el Delta del Santiago.

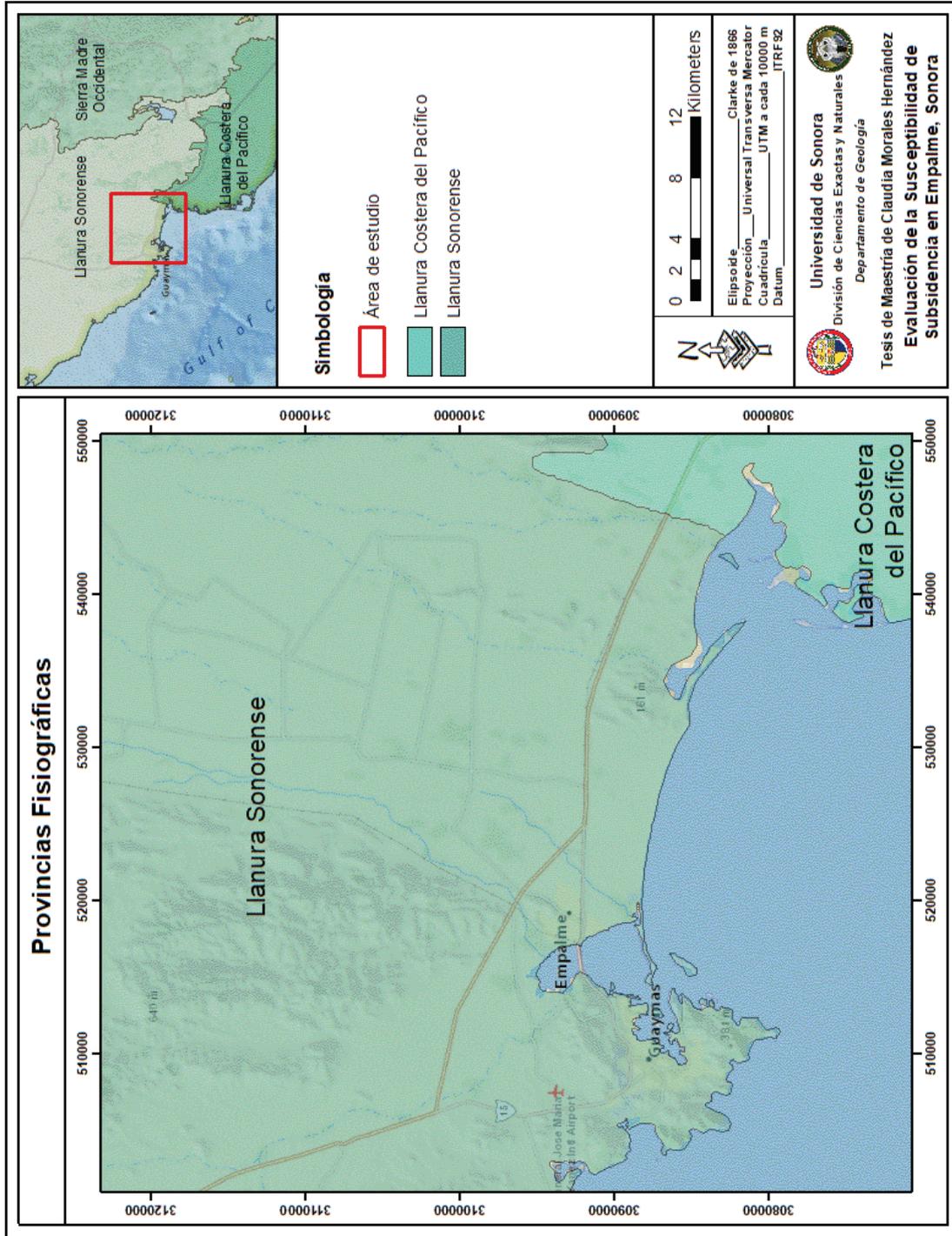


Figura 5. Provincias fisiográficas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).

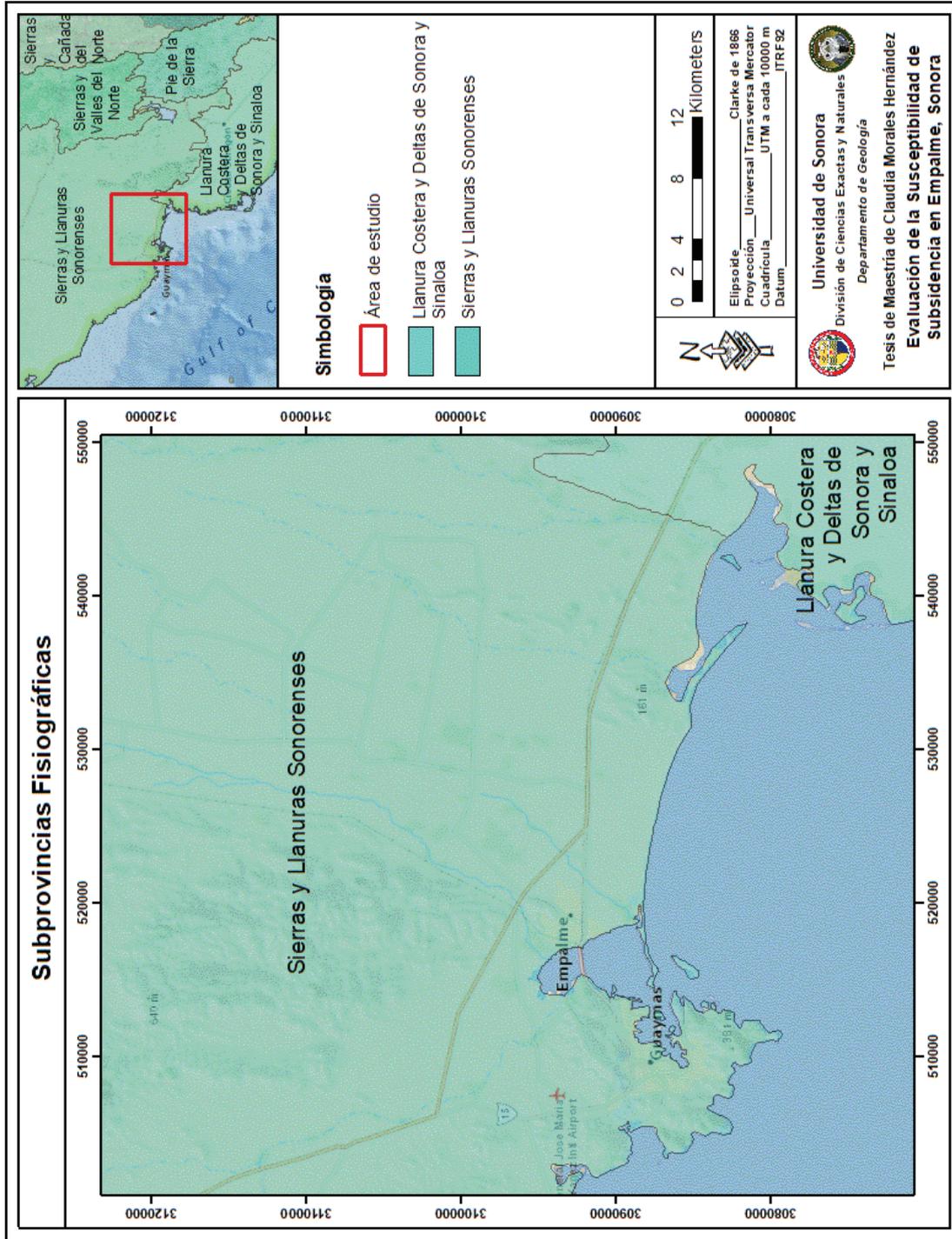


Figura 6. Subprovincias fisiográficas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).

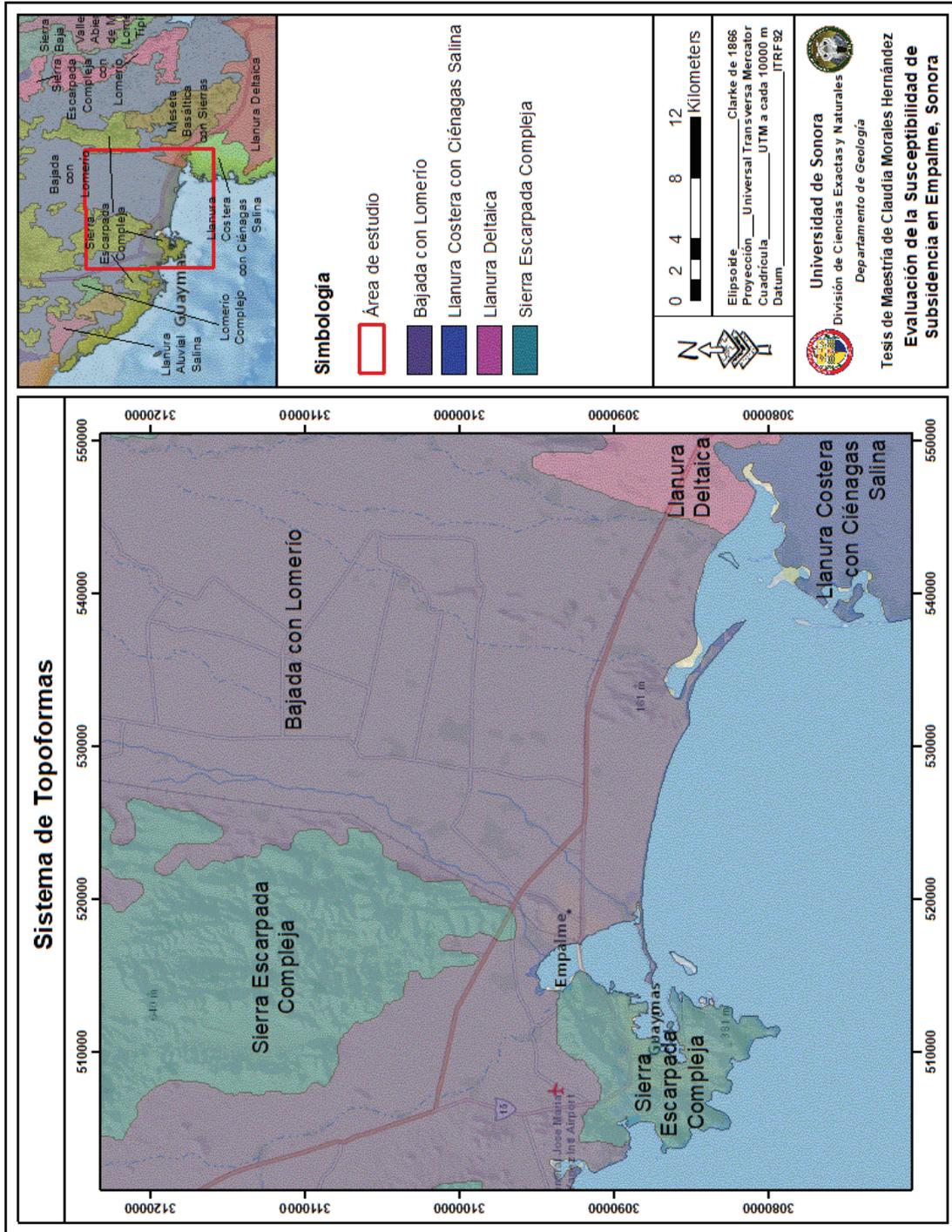


Figura 7. Sistema de topoformas del área de estudio (Continuo Nacional INEGI, 2002).

La Subprovincia Fisiográfica **Sierras y Llanuras Sonorenses** se prolonga hacia el norte, con los límites de los Estados Unidos y donde continúa a través del Desierto de Mojave y el Desierto de Gila. Se caracteriza, principalmente, por la presencia de sierras aisladas, alargadas y angostas, con un relieve generalmente accidentado, los cuales se encuentran limitados por extensas llanuras desérticas a semidesérticas y en donde los pequeños afluentes en temporadas de lluvias descargan sobre estas planicies sin llegar al mar, formando pequeñas llanuras de inundación.

Sus sierras son bajas, separadas por llanuras. Tales sierras son más elevadas (700 a 1,400 msnm) y más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 14 km) en el occidente. Casi en todos los casos, las sierras son más angostas que las llanuras y su espaciamiento es tal que nunca quedan fuera de la vista. Sus pendientes son bastante abruptas, siendo frecuentes las mayores de 45°; en tanto que las menores a 20° son raras. En general, las cimas son almenadas, es decir, dentadas.

Las llanuras representan alrededor del 80% de la subprovincia; están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes. Los arroyos que drenan esta región efectúan una fuerte erosión produciendo espolones laterales que se proyectan en las llanuras.

La Subprovincia Fisiográfica **Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa** comprende desde el parteaguas de la Sierra El Bacatete hasta los límites entre las cuencas de los Ríos San Lorenzo y Elota, al norte de Mazatlán y al oriente del Mar de Cortés. La integran, en su mayor parte, tres grandes deltas, los de los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte (parcialmente fusionados los dos primeros), en los cuales están ubicados extensos distritos de riego. Todo su territorio se encuentra casi a nivel del mar y la mayoría del mismo está cubierto de material aluvial. La línea de costa es sinuosa con un buen número de bahías y esteros.

2.2. Geología Regional

La geología del área de estudio se encuentra representada por diversas unidades litológicas, que van desde el Paleozoico hasta el Reciente (**Figura 8**).

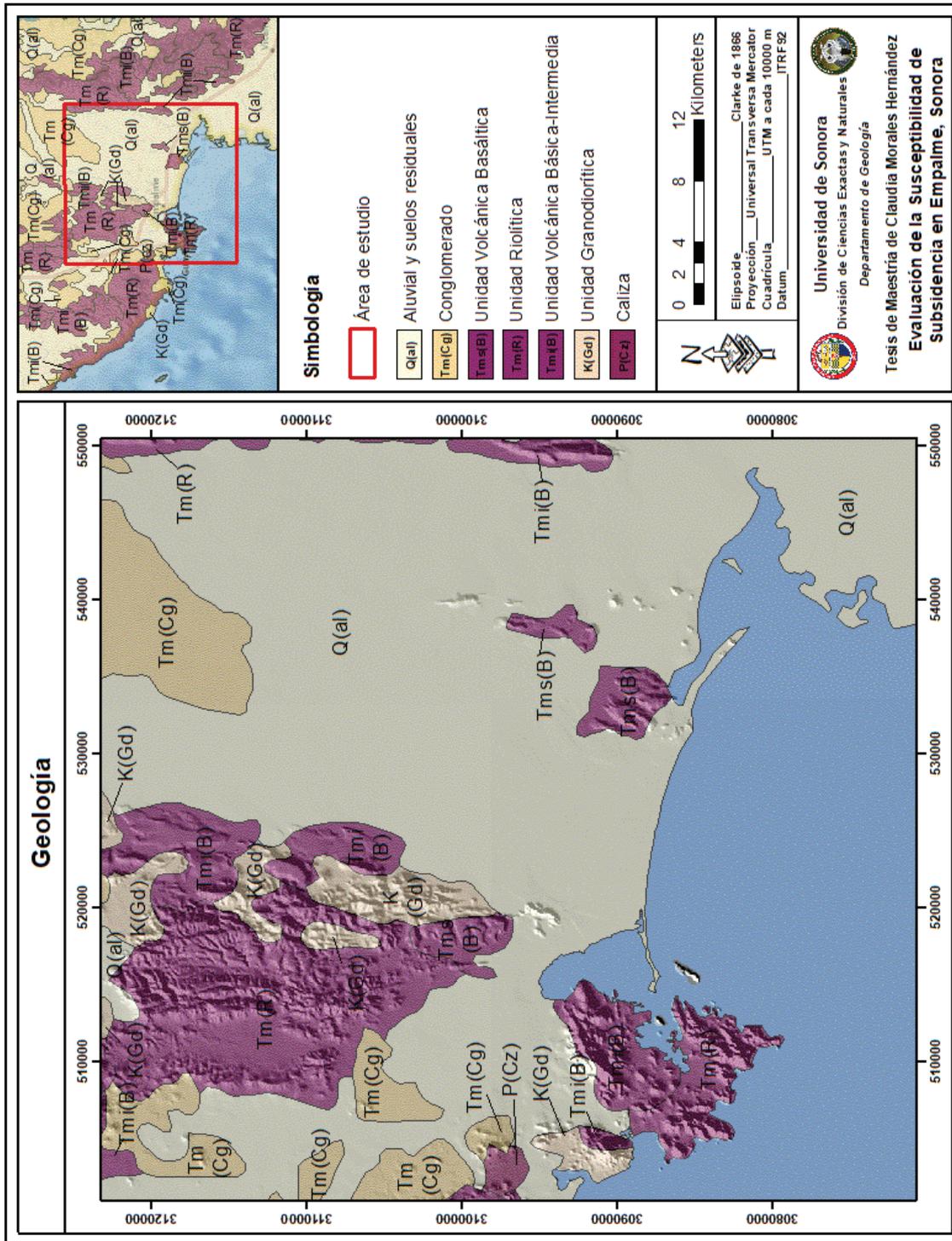


Figura 8. Mapa geológico regional del área de estudio (modificado de INEGI, 2002, escala 1:1,000,000 y de Mora et al., 2004).

Las rocas más antiguas dentro del área son unas calizas del Paleozoico, una granodiorita cretácica y rocas del Mesozoico; mientras que el relleno sedimentario está constituido por depósitos aluviales (INEGI, 2004; Mora *et al.*, 2004; Vega *et al.*, 2004).

2.2.1. Paleozoico

La unidad más antigua corresponde a una caliza del Paleozoico, **P(Cz)**, que presenta zonas de metamorfismo de contacto con presencia de hornfels y mármol debido a intrusiones de cuerpos ígneos graníticos y granodioríticos de edad cretácica (SGM, 2002). Los afloramientos son de poca extensión, encontrándose como posibles techos colgantes (Vega *et al.*, 2004) y en contacto discordante con rocas mesozoicas (riolita y conglomerado); se localizan al NW de las ciudades de Guaymas y Empalme.

2.2.2. Mesozoico

Este periodo está representado predominantemente por rocas ígneas intrusivas, las cuales componen el basamento de la región.

Unidad Granodiorítica, K(Gd): Hacia finales del Cretácico Superior y Terciario inferior, se emplazaron cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, afectando tanto a las rocas paleozoicas como a las mesozoicas. Esta unidad está constituida por un intrusivo compuesto de granodiorita de hornblenda y facies hipabisales porfídicas; es la causante del metamorfismo de contacto en unidades más antiguas; asimismo, se encuentra cortada por diques andesíticos, aplíticos y pegmatíticos (Vega *et al.*, 2004).

Estos afloramientos se encuentran al WNW de Guaymas, sobre la Carretera Internacional Hermosillo-Guaymas, y hacia la parte norte-centro del área de estudio sobre la Sierra de Santa Úrsula (norte de Empalme).

La granodiorita de hornblenda ha sido fechada por hornblenda y biotita, dando una edad de 83 ± 2 y 81 ± 3 Ma, correspondiente al Cretácico Superior (K-Ar; McDowell y otros, *in* Mora, 1992).

Estas rocas mesozoicas están sobreyacidas, de manera discordante, por lavas de edad miocénica, principalmente félsicas, que han sido asignadas al Arco Circum-Golfo (Gastil y Krummenacher, 1977), con edades entre 24 y 11 Ma (Mora y McDowell, 2000).

2.2.3. Cenozoico

El Cenozoico está representado por secuencias de rocas volcánicas y sedimentos clásticos continentales, cubriendo grandes áreas (SGM, 2000).

2.2.3.1. Terciario

Este periodo se representa principalmente por rocas ígneas y sedimentarias en el área de estudio.

Por lo que respecta a las rocas ígneas, son principalmente de tipo extrusivas, como basaltos y riolitas, aflorando tanto al este como al oeste del Valle Empalme-Guaymas, sobre las sierras del Bacatete y Santa Úrsula, así como al sur del mismo y los alrededores de la Ciudad de Guaymas.

Las rocas sedimentarias de este periodo son conglomerados de origen continental, producto de la erosión de las rocas volcánicas preexistentes, y afloran tanto al norte como al oeste del área de estudio (en el Valle Empalme-Guaymas y Sierra La Ventana).

Unidad Basáltica, Tm_i(B): También es denominada como **Unidad Volcánica Básica-Intermedia**; está representada por andesitas, riolitas y alternancia de tobas y derrames extensos de basaltos y basálticos-andesíticos; se encuentra aflorando en la porción occidental del área de estudio formando la parte alta de las sierras de la Ventana y de Santa Úrsula, así como el Cerro El Vigía, al norte de la Ciudad de Guaymas y el Cerro Picacho de San Rafael. También afloran en la porción oriental del Valle de Empalme-Guaymas, formando la mayor parte de la Sierra del Bacatete, la cual separa este valle con el de Agua Caliente; y en el sur de esta sierra se encuentran cubiertas parcialmente por derrames basálticos y tobas pumíticas, estando expuestas solamente en las partes más altas.

Las rocas andesíticas se componen de hornblenda y augita, y se presentan de forma masiva con un gran contenido de fracturas. En la parte basal de este conjunto se encuentran coladas basálticas, dispuestas en delgados flujos de lava, de espesores métricos y en la parte media y alta cambian a basaltos andesíticos (Vega *et al.*, 2004). Localmente están afectadas por alteración hidrotermal y la erosión provoca que ciertas capas resalten alternadamente con respecto a partes más blandas.

Estos basaltos tienen un color gris claro a gris morado en superficie fresca y son café rojizo a café morado en superficie de intemperismo; son porfídicos y presentan, generalmente, fenocristales rojos que corresponden a olivinos iddingsitizados; algunos muestran laminaciones o pseudolaminaciones de flujo (Vega *et al.*, 2004).

A esta unidad se le asigna una edad de 17 ± 0.5 Ma, Mioceno inferior (K-Ar en roca total, McDowell citado en Mora, 1992); se puede correlacionar con las unidades La Espuela, El Mezquite y La Pasión definidas por Mora (1992) en la Sierra de Santa Úrsula, al norte de Empalme, quien obtuvo una edad en la Unidad La Espuela de 22.7 ± 0.5 Ma y 5 diferentes edades en la Unidad El Mezquite, comprendidas entre 18.8 ± 3.7 y 15.3 ± 2.4 Ma.

Los flujos de esta unidad cubren en discordancia a las rocas paleozoicas y mesozoicas, descritas anteriormente.

Unidad Riolítica, Tm(R): En esta unidad están englobadas rocas volcánicas, como son: riolitas con alternancia de tobas, andesitas y derrames basáltico-andesíticos; también es denominada como **Unidad Volcano-Félsica**.

Las rocas de este grupo se encuentran al extremo NE del Valle de Empalme-Guaymas, en la Sierra del Bacatete; en las sierras de Santa Úrsula y La Ventana, al norte de Empalme; dentro de la Ciudad de Guaymas, hacia la parte sur, en los cerros El Cabezón y San Rafael, entre otros; y al extremo oeste del Valle de San José de Guaymas.

Las rocas pertenecientes a este grupo están cortadas por fracturas de enfriamiento subhorizontales y fracturas más verticales. Los planos de pseudoestratificación de los derrames están inclinados hacia el valle de la Sierra del Bacatete, en tanto que en la porción

occidental de las sierras de Santa Úrsula y La Ventana o Venada buzando hacia el Valle de San José de Guaymas.

Las rocas que forman la base de la unidad corresponden a tobas con fragmentos de rocas volcánicas (andesitas, riolitas e ignimbritas). Hacia la cima del paquete de tobas, empiezan a intercalarse coladas de vidrio perlítico de color oscuro, a veces laminadas, que por recristalización pasan a riolitas laminadas con fuerte plegamiento de flujo (Vega *et al.*, 2004).

La roca piroclástica cubre en discordancia angular a las andesitas y basaltos de la unidad volcánica intermedia. Este paquete de tobas se encuentra siempre basculando hacia el oriente por una serie de fallas normales que producen semigrabens escalonados.

Al occidente de la Ciudad de Guaymas, en el Cerro de Bacochibampo, esta unidad está representada por flujos vítreos o vitrificados sobre las andesitas de la Unidad Volcánica Básica Intermedia, **Tm_i(B)**, la cual Johnpeer (1977) clasificó como riocacita; es de color negro con fenocristales de plagioclasa, vesiculares. La textura y los xenolitos indican un proceso de contaminación del magma al llegar a la superficie, lo cual puede explicar la composición química en el rango de riocacita, cuando debería ser dacita o andesita (Johnpeer, 1977).

En los cerros que se encuentran alrededor de la Ciudad de Guaymas, como El Vigía, Lomas de Cortés y El Potrerito, se depositaron, sobre los basaltos y andesitas, derrames dacíticos con textura porfídica, de color rosado a café, que presentan laminaciones y pliegues de flujo. Sobre estos derrames hay depósitos de tobas de color rojizo, con fragmentos de diferentes rocas volcánicas, y sobre estas tobas hay un grueso derrame de vitrificados de color negro con fenocristales rosas de feldespatos.

Hacia arriba, el vitrificado gradúa a una roca de la misma composición mineralógica, pero con la matriz recristalizada y contiene numerosos microlitos de forma nebulosa, posiblemente de plagioclasas, feldespatos y cuarzo (Vega *et al.*, 2004). Esta unidad contiene fragmentos de dacita con plagioclasas y clinopiroxenos, así como rocas más félsicas de origen intrusivo con plagioclasa, biotita y hornblenda. La textura en criba de las plagioclasas y la presencia de feldespatos indican, de igual manera, un proceso de contaminación magmática durante su ascenso a través de las rocas basales correspondientes a dacitas y granofidos (Vega *et al.*, 2004).

El paquete superior es muy similar al paquete inferior, pero de color morado claro; contiene partes vítreas en la base de los flujos y zonas con laminaciones. Este paquete es cortado por brechas explosivas que tienen el aspecto de tobas arenosas con alteraciones amarillentas y que poseen clastos de las rocas encajonantes de más de un metro de longitud. Esta unidad es resistente a la erosión y forma los crestones más prominentes de los cerros que rodean y se sitúan dentro de la Ciudad de Guaymas, como El Vigía, El Cabezón y San Rafael, entre otros.

Las rocas descritas previamente fueron definidas por Johnpeer (1977) como Riodacitas Baco-chibampo y como Toba Soldada del Cerro El Vigía. El adelgazamiento abrupto de la unidad sugiere que el emplazamiento de este cuerpo se da en un espacio provocado por el colapso de las unidades inferiores al mismo, a lo largo de una estructura semicircular que fue propuesta por Johnpeer (1977) como una posible caldera.

Debido a su entorno regional, la edad de la unidad de rocas félsicas descritas anteriormente se correlaciona con la Unidad La Ventana y Santa Úrsula (Mora, 1992), las cuales están conformadas por voluminosos flujos félsicos (perlíticos en la base), domo y tobas de flujo de cenizas. En esta unidad se obtuvieron 5 edades con el método isotópico K-Ar en plagioclasas, las cuales se ubican entre 12.3 ± 0.3 Ma y 11.4 ± 0.3 Ma, correspondiente al Mioceno medio (Mora, 1992).

Este periodo volcánico félsico tuvo manifestaciones en distintas regiones, después de un periodo de quietud volcánica. En Guaymas fue principalmente fluidal con intrusiones hipabisales en la parte final.

Esta unidad sobreyace a la Unidad Basáltica del Mioceno inferior y subyace en discordancia a la Unidad Basáltica (Basalto Empalme) del Mioceno superior.

Unidad Basáltica, Tm_s(B): También denominada **Unidad Volcánica Basáltica**; aflora al oriente de la Ciudad de Guaymas, en la porción sur del Valle de Empalme-Guaymas, donde se presentan coladas basálticas delgadas que sobreyacen en discordancia a los derrames de la Unidad Volcánica Félsica. Estas coladas basálticas afloran también al norte de Empalme y han sido clasificadas como toleítas con olivino y agrupadas bajo el término de Basaltos de Empalme por Johnpeer (1977) y por Mora (1992) como Flujos Las Trincheras.

Localmente existen algunos conglomerados arenosos en la base y algunas areniscas intercaladas entre las coladas. En muestra de mano, la roca es oscura y masiva, y hacia la cima de los flujos se presentan vesículas rellenas de calcita (Vega *et al.*, 2004).

Los afloramientos de estos derrames basálticos que quedan expuestos en el paisaje actual corresponden a los vestigios de una serie de coladas que en el Mioceno cubrían, probablemente, la mayor parte de los valles de Empalme-Guaymas y de Cruz de Piedra. Este basalto se presenta de color negro, vesicular y fracturado, buzando, preferentemente, hacia los valles de Empalme-Guaymas y Cruz de Piedra.

Mora (1992) obtuvo 4 edades con un rango de 10.3 ± 0.3 Ma a 8.5 ± 1.5 Ma, correspondientes al Mioceno superior, aproximadamente. En la Unidad Basalto de Empalme existe una edad de 11.2 ± 2.7 Ma en roca total (obtenida por McDowell, citado por Mora, 1992).

Conglomerado, Tm(Cg): Contemporáneo a las riolitas y basaltos se encuentra un conglomerado, el cual consiste principalmente de clastos volcánicos y alternancia de limos y arcillas, de color verde rojizo o café rojizo, con capas delgadas de caliche, depositadas en un ambiente de paleocuenca.

Los afloramientos correspondientes a esta unidad afloran en la parte norte del Valle Empalme-Guaymas, en la esquina NE del área de estudio; al norte de la Sierra de Santa Úrsula; al norte y oeste de San José de Guaymas; y al NW de la Sierra La Ventana.

Esta formación está compuesta por la acumulación de materiales erosionados de rocas preexistentes: conglomerados, areniscas con flujos intercalados de andesitas basálticas, ocupando los grandes valles desarrollados durante la fase extensional del *Basin and Range*.

Sobreyace en discordancia a las calizas del Paleozoico, **P(Cz)**, y subyace a los depósitos aluviales del Cuaternario, **Q(al)**.

2.2.3.2. Cuaternario

Finalmente, en este periodo, se depositaron, en las partes bajas (valles), materiales de tipo aluvial, **Q(al)**, y suelos residuales que constituyen terrenos de cultivo, formando la mayor

superficie de afloramientos de la zona estudiada. Están compuestos por: boleos, gravas, arenas, limos y arcillas, en ocasiones consolidados, y, en algunas áreas, conglomerados polimícticos (SGM, 2002).

Estos sedimentos clásticos no consolidados son derivados de las unidades geológicas anteriormente descritas, las cuales fueron erosionadas, transportadas y depositadas por corrientes fluviales, rellenando las depresiones. Forman, por lo tanto, la planicie aluvial y fluvial de los valles de Empalme-Guaymas y San José de Guaymas, pudiéndose distinguir, en los mismos, diversas estructuras secundarias, como conos aluviales, llanuras de inundación, dunas, barras, etcétera.

El depósito de estos materiales inició en el Plioceno y continuó hasta el Reciente, habiéndose acumulado, en este tiempo, espesores promedio de 160 metros.

La distribución de estos materiales en el subsuelo consiste de arenas, gravas, arcillas y horizontes de caliche en capas interdigitadas, la mayoría de las cuales no muestran continuidad horizontal a causa de los diversos medios ambientes de depósito que han prevalecido. No obstante, dentro de esta errática distribución espacial le han podido distinguir en el Valle de Empalme-Guaymas una capa de arcilla café continental, cuya continuidad también la han detectado en la porción sur del valle (CONAGUA, 2009).

2.3. Geología Estructural Regional

En el noroeste de México (Sonora y Baja California) han ocurrido distintos eventos tectónicos a lo largo de su evolución geológica, tales como subducción y extensión, que finalmente son los responsables de la gran diversidad volcánica y geomorfológica de la región. En general, se puede hablar de distintas etapas tectónicas.

La primera fase ocurrió entre 90 y 40 Ma en el Estado de Sonora con el emplazamiento del Batolito Laramide (Damon, 1978; Damon *et al.*, 1981; Cochemé, 1985). Esta intrusión magmática se asocia a la subducción de la Placa Oceánica Farallón respecto a la de Norteamérica (Hamilton, 1969; Dickinson, 1979).

Después de esta etapa se tiene un gran periodo de volcanismo en Sonora (Eoceno-Oligoceno). A esta unidad, McDowell y Clabaugh (1979) la definieron como Complejo Volcánico Superior con una edad de 34 y 27 Ma, dentro de los límites de Durango y Sinaloa.

La deformación extensional cenozoica más antigua en Sonora está fechada entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, hace aproximadamente 25 Ma, siendo el fin de esta subducción debido al encuentro del rift del este del Pacífico y la Placa de Norteamérica, conocido como la Provincia Extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989; Martín, 2000; Mora, 2004; Fletcher *et al.*, 2007). Según modelos, al interrumpirse la subducción se produjo el hundimiento de la litósfera (Dickinson, 1989; Spencer y Reynolds, 1989) causando un influjo térmico a lo largo de Sonora y California; proceso que provocó el movimiento de fallas de bajo ángulo asociado a fallas lítricas secundarias o fallas normales de alto ángulo, dando lugar a un cinturón de domos que afloran en una zona de cizalla dúctil, conocidos como Núcleos Metamórficos Complejos, localizados en las zonas de Mazatán (Vega y Calmus, 2003; Wong y Gans, 2003) y Magdalena (Nourse, 1989; Nourse *et al.*, 1994; Vega, 1996). La extensión durante este periodo tiene una dirección NE 70°-80° y se le ha denominado fase *pre-Basin and Range* (Spencer y Reynolds, 1989), siendo su edad principalmente entre el Oligoceno superior-Mioceno inferior.

Los límites de esta provincia (Stock y Hodges, 1989) son más difusos en Sonora que en la Península de Baja California, debido a la superposición de las estructuras relacionadas con la apertura del golfo sobre los bloques basculados asociados al evento de Cuencas y Sierras, CS (Stewart y Roldán, 1994) (**Figura 9**). Así mismo, en el SE y el centro-este de Sonora, McDowell *et al.* (1997) identificaron una fase de deformación del Oligoceno-Mioceno, caracterizada por la formación de cuencas, con orientación NW-SE.

La apertura del Golfo de California se inició durante el Mioceno medio (~15 Ma) al superior (Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda, 2000; Stock, 2000; Aragón y Martín, 2007; Helenes *et al.*, 2009) y creó una serie de cuencas transtensionales a lo largo del límite entre las placas de Norteamérica y Pacífico, lo que dio lugar a la formación de una serie de rifts a lo largo del Golfo de California. La deformación que se produjo en el Golfo de California se caracteriza por tener una fuerte componente lateral derecha que resulta en una apertura oblicua.

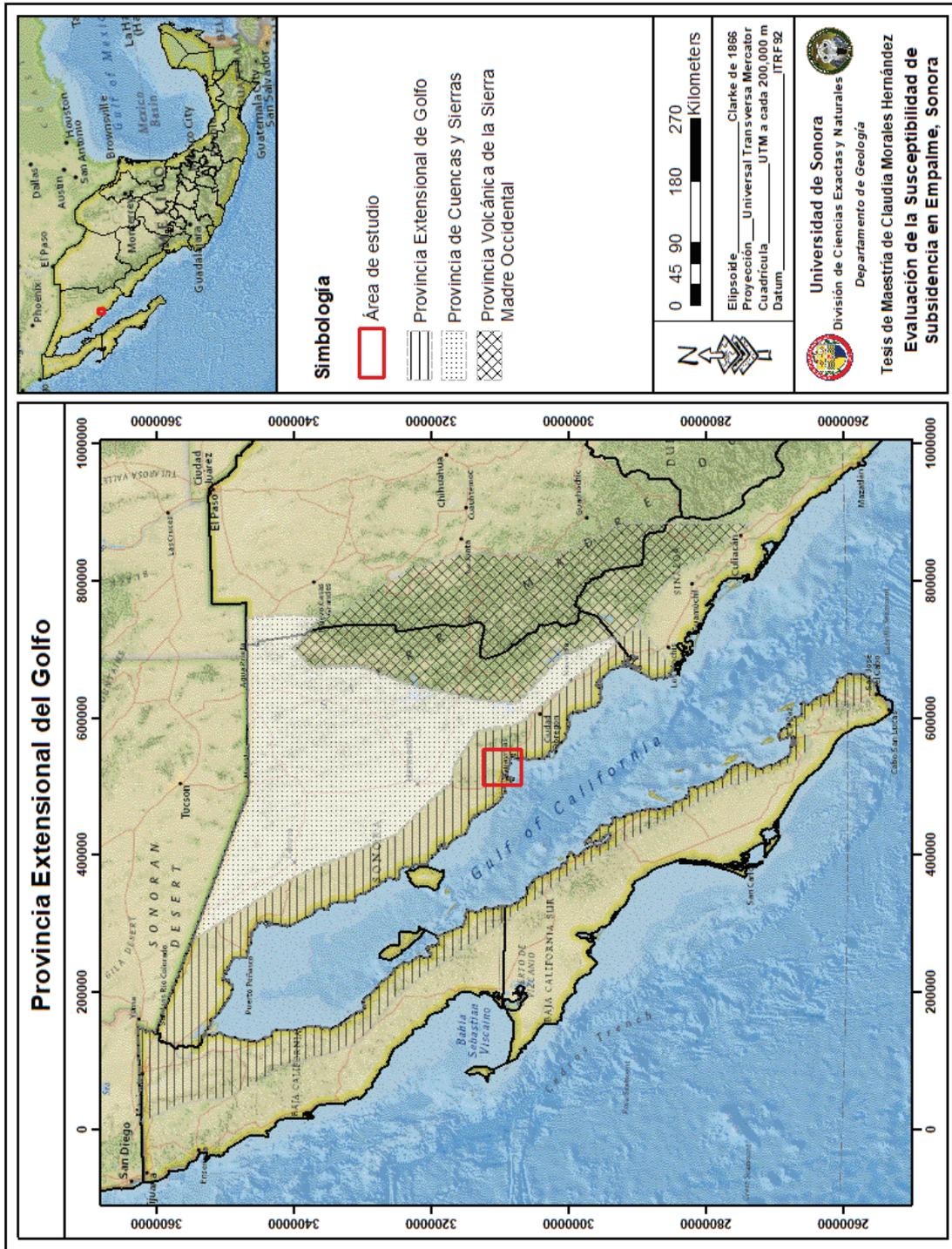


Figura 9. Mapa del NW de México mostrando la Provincia de Cuencas y Sierras en Sonora y la Provincia Extensional del Golfo (PEG) en las costas del Golfo de California (modificado de Stock y Hodges, 1989); también se muestra la localización general del área de estudio.

Hace 20 Ma se formó el episodio magmático miocénico de la región de la Sierra Madre Occidental, causado por el influjo térmico que produjo un adelgazamiento en la corteza (Cochemé, 1985). Este evento se caracteriza por un volcanismo bimodal representado por intercalaciones de andesitas y tobas pumíceas ácidas, que pueden alcanzar localmente hasta los 800 m.

Posterior a esto, continuó una fase tectónica distensiva, denominada “*Basin and Range*”, que se distingue por la formación de sierras y valles paralelos orientados normalmente con una dirección de NW 20°, con valles más estrechos hacia la Sierra Madre Occidental y más gruesos hacia el Golfo de California.

Según Elston (1976) esta distensión inició hace 18 ± 3 Ma en Arizona, mientras que para Cochemé (1985) inició hace unos 17 Ma (Mioceno inferior) en Yécora; aunque también la fechan con edades de ± 10 Ma (Zoback *et al.*, 1981, *in* Radelli, 2005). La dirección de extensión en Arizona fue ENE-WNW y es similar a Sonora.

Esta fase es importante en el Estado de Sonora, pues controla la morfología de las sierras y los valles en buena parte del estado (Vega *et al.*, 2004).

Durante esta fase ocurrieron fallas que causaron la ruptura e inclinación de las unidades volcánicas del Mioceno, presentando fallas con rumbo NE 20° y NW 20°. En esta etapa, Baja California y Sonora se encontraban unidas; sin embargo, se infiere que entre 15 y 5 Ma existió una depresión nombrada como Proto-Golfo de California. Esto se define a partir de la existencia de sedimentos marinos en varias localidades, asociados al desarrollo de un rift continental (Ingle, 1973).

Recientemente se han realizado diversos trabajos que involucran el establecimiento de un evento volcánico de gran magnitud durante el Mioceno medio en el NW de México. Este evento se asocia con el rift del Proto-Golfo de California, el cual ha sido atribuido a la ruptura continental y al adelgazamiento litosférico de un rift hacia los 12 Ma.

En este tiempo ya había cesado el volcanismo del arco continental, dando origen a un gran depósito ignimbrítico hiperalcalino reconocido en Sonora y Baja California (Vidal, 2005; Stock *et al.*, 1999; Oskin *et al.*, 2001; Olguín, 2010).

Los vestigios de este evento volcánico han sido identificados y estudiados en la Sierra San Antonio, Lista Blanca, El Bacatete y Cerro El Sarpullido (Vidal, 2005), así como en la Sierra Libre, donde es posible apreciar un gran volumen de estas rocas hiperalcalinas conformado por varias manifestaciones riolíticas e ignimbríticas (Barrera y Vidal, 2010).

Para algunos autores, la apertura del Golfo de California ocurre cuando cesa la subducción y la dorsal del este del Pacífico alcanza de manera oblicua el borde continental de la Placa de Norteamérica, originando una transición hacia un sistema de deslizamiento lateral y rifting, con edades que varían de los 4.5 Ma (Radelli, 2005), 14 Ma (Lylle y Ness, 1991) o, incluso, 17 Ma (Humphreys y Weldon, 1986).

Según Spencer y Reynolds (1989) un cambio fundamental ocurrió en Arizona, alrededor de 14 Ma, correspondiendo con el surgimiento de un volcanismo basáltico toleítico. La distensión asociada con este evento tiene una dirección ESE-WNW; los autores citados la correlacionan con los movimientos de apertura del Golfo de California.

Este proceso distensivo toma el movimiento lateral dextral del Sistema de Fallas de San Andrés, generando una actividad transtensional y el consecuente desplazamiento continuo hacia el NW de la Península de Baja California y parte de California, E.E.U.U. Las estructuras resultantes son un conjunto de fallas escalonadas de desplazamiento lateral de tipo dextral a lo largo del Golfo de California (**Figura 10**).

En la región de Guaymas y San Carlos, se exhiben las rocas volcánicas, producto de la apertura del Golfo de California, como es el caso de basaltos de afinidad toleítica que regionalmente se localizan en los bordes de Sonora y Baja California, así como en algunas islas y en el interior del Golfo de California. Este último evento tectónico es el que influyó para tener las estructuras actuales en el área de estudio.

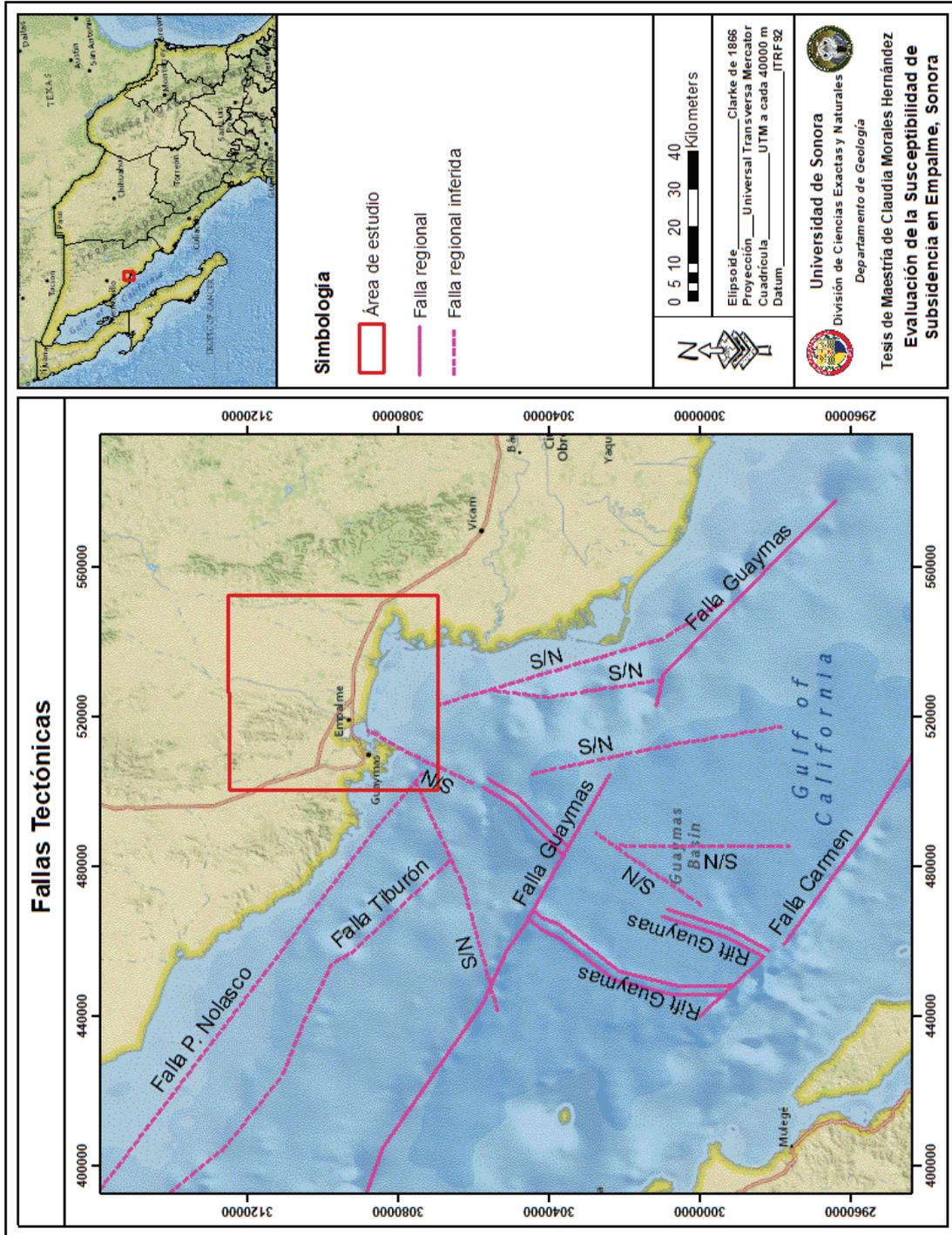


Figura 10. Mapa tectónico regional del área de estudio.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis Sismológico

En cualquier lugar, los fenómenos naturales pueden afectar el entorno habitado por el hombre, por lo que éste debe estar consciente de dichos fenómenos con el fin de minimizar los riesgos, puesto que no está dentro de su posibilidad detener los procesos naturales.

Como ya se ha mencionado en el Capítulo de Introducción, así como en el Subcapítulo de Antecedentes, los fenómenos naturales a los que los asentamientos urbanos están expuestos y que se consideran más significativos en el área de estudio son: inundaciones, deslizamientos de rocas y sismos. Debido a que los dos primeros fenómenos mencionados anteriormente no son causantes de fenómenos de subsidencia en el área de estudio, nos enfocaremos a los últimos, sismos, ya que para este estudio sí se considera un causante del fenómeno de subsidencia, pues es una zona que se encuentra dentro de un área muy susceptible a éstos.

La ocurrencia de un sismo va siempre acompañada de fenómenos tales como reactivación de antiguas fallas, tsunamis, colapsos, deslizamientos de suelo y roca, flujos de lodo, entre otros. Los efectos de estos procesos pueden mitigarse si se conoce la distribución de las áreas potenciales de ser afectadas en función de sus características geológicas, geohidrológicas y geotécnicas.

El análisis reciente a raíz de la ocurrencia del sismo de 1985 en la Ciudad de México, de la distribución de la sismicidad a nivel global, regional y local, ha permitido caracterizar a la República Mexicana en 4 diferentes zonas sísmicas (SGM, 2017; CFE, 2017), como una medida básica a tomar en los reglamentos y normas de construcción y con fines de diseño antisísmico (**Figura 11**). Esta distribución incluye a Sonora como una zona de sismicidad baja y las regiones de Baja California, Guerrero y Oaxaca dentro de las zonas de sismicidad más alta.

La **Zona A** es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y en donde no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores, por lo tanto, es de intensidad sísmica baja.

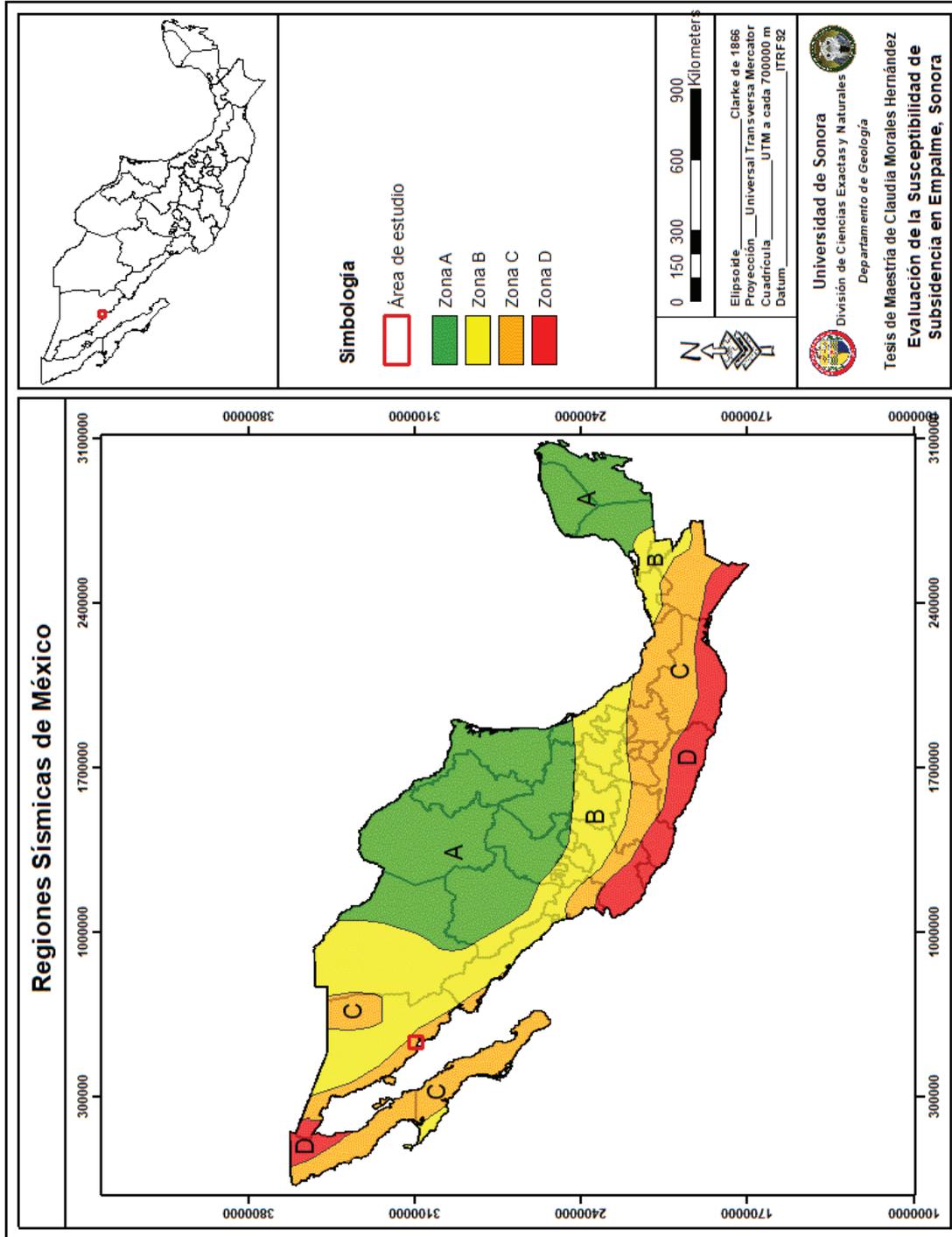


Figura 11. Regiones sísmicas de la República Mexicana. Zona A: Escasa actividad sísmica y de baja magnitud; Zonas B y C: zonas de intensidad intermedia con sismos pocos frecuentes; Zona D: sismos muy frecuentes donde han ocurrido los de mayor magnitud y generando daños (figura tomada del Pérez *et al.*, 2015).

Las **zonas B y C** son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones, pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo; sus intensidades sísmicas son de moderada a alta, respectivamente. Y la **Zona D** es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente, las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad y con intensidad sísmica muy alta.

Las primeras mediciones realizadas sobre la fuerza de los sismos se limitaron a la descripción de sus efectos, lo que condujo a la confección de las escalas de intensidades macrosísmicas, en las cuales los efectos se clasifican en grados y abarca desde la sola detección por instrumentos sensibles hasta fenómenos del tipo de cambios en el relieve, con un énfasis mayor en cómo son percibidos los terremotos por el hombre, y que daños producen sobre las edificaciones.

Actualmente existen varias maneras de medir los sismos, ya sea utilizando la Escala de Magnitud de Richter o la de Intensidad de Mercalli y desde 1979, los sismos con magnitud superior a 6.9 se miden con la Escala Sismológica de Magnitud de Momento, por tratarse esta última de una escala que discrimina mejor en los valores extremos (ver **Anexo 1**).

La Escala de Richter, también conocida como Escala de Magnitud Local (M_L), mide la energía de un temblor en su centro o foco, es decir, la magnitud del mismo, la cual crece de forma exponencial de un número al siguiente; está basada más en las matemáticas (ver **Anexo 1**).

La Escala de Mercalli es más subjetiva, puesto que la intensidad aparente de un terremoto depende de la distancia entre el centro y el observador. Varía desde I hasta XII, describiendo y evaluando los terremotos más en función de las reacciones humanas (ver **Anexo 1**).

La Escala Sismológica de Magnitud de Momento, M_w , es una escala logarítmica usada para medir y comparar terremotos; está basada en la medición de la energía total que se libera en un sismo. Fue introducida en 1979 por Thomas C. Hanks y Hiro Kanamori como la sucesora de la Escala Sismológica de Richter, coincidiendo y continuando con los parámetros de esta última (ver **Anexo 1**). El Centro Nacional de Información Sísmica (*National Earthquake Information Center*), dependiente del Servicio Geológico de los Estados Unidos, y sismólogos

internacionales usan esta escala para la medición y comparación de terremotos de una magnitud superior a 6.9.

Actualmente, el país cuenta con una red sísmica conformada por casi 102 equipos en operación, de los cuales 61 estaciones son de banda ancha, 31 son estaciones digitales pertenecientes al Valle de México y 9 son estaciones telemétricas; todas ellas envían sus datos o señal en tiempo real a la Estación Central, localizada en el Instituto de Geofísica de la UNAM para su análisis y evaluación.

Históricamente son al menos dos los terremotos fuertes que han sacudido a nuestro Estado. El primero ocurrió en el año de 1887, el 3 de mayo, con una magnitud de 7.4, al sur de la hoy Ciudad de Agua Prieta y provocó la destrucción de asentamientos urbanos en la sierra alta del Estado de Sonora. El segundo sucedió en el año de 1923, con su epicentro localizado en la misma población anterior (Cerro Pitaycachi, cerca de la Colonia Morelos) sintiéndose su influencia fuertemente en los poblados de Huásabas y Granados. Aunque estos sismos no se encuentran dentro del área de estudio es importante hacer mención de los mismos, ya que su influencia fue bastante amplia.

Desde aquel entonces hasta la actualidad, suceden numerosos microsismos que, por carecerse de la infraestructura básica, no pueden ser monitoreados. Sin embargo, al observarse los registros de la sismicidad del suroeste de los Estados Unidos, podemos percatarnos de la gran cantidad de sismos que se han presentado y se presentan en las costas de Sonora y el Golfo de California (Vega *et al.*, 2004).

Los sismos de la entidad se pueden asociar a dos zonas sísmicas: la primera se encuentra en el Golfo de California y la segunda en la parte noreste del estado.

Los sismos del golfo tienen magnitudes hasta de 7° y se originan en una profundidad <33 km. En los últimos 35 años, han ocurrido, en esta zona, 9 temblores con magnitud >6°. Estos temblores están causados por el movimiento lateral izquierdo de aproximadamente 35 mm/año a lo largo de un sistema de fallas en el límite entre dos placas (Ramírez, 2005). El movimiento a lo largo de estas fallas ha causado, sobre tiempos geológicos, la apertura del Golfo de California.

Este sistema de fallas es una de las zonas sísmicas más activas a nivel mundial y entra a tierra cerca de Mexicali, ligándose más al norte con la Falla San Andreas. En su extensión hacia el sur, dentro del Mar de Cortés; esta zona se comporta de manera menos activa, pero sin que dejen de presentarse sismos con magnitudes mayores o igual a los 7°.

La región de Guaymas y Empalme está ubicada en un área de actividad sísmica moderada (**Figura 11**), según Pérez *et al.* (2015) y a los datos sísmicos disponibles desde 1901 hasta julio del 2018. La actividad está relacionada con la extensión del Golfo de California.

La actividad sísmica histórica en la vecindad de la región estudiada se obtuvo de las bases de datos del Servicio Sismológico Nacional y el *U.S. Geological Survey*. De estas bases de datos se eligieron aquéllos que ocurrieron dentro de un diámetro de 50 y 100 km de Empalme, obteniéndose un total de 839 sismos con magnitudes entre 2.6° y 5.7° en la escala de Richter (**Figura 12**). En este mapa se puede observar que existen dos grupos de focos sísmicos (concentración de epicentros): uno hacia el SW de la Ciudad de Empalme y otro hacia el SE de ésta; ambos grupos o enjambres de focos sísmicos se encuentran a más de 50 km y a menos de 100 km de dicha ciudad (**Figura 12**). El primer grupo presenta una orientación NW, concordando con las fallas principales del Golfo de California, mientras que el segundo muestra una dirección al NE (**Figura 12**), coincidiendo con el fallamiento y fracturamiento en el Valle de Empalme-Guaymas (Graben de Empalme).

Asimismo, se tienen registros de sismos que se consideran que sobrepasaron la magnitud 7 y que ocurrieron en el lapso entre principios de siglo y 1963, pero en ese entonces la red sismográfica no estaba bien desarrollada y esas magnitudes son estimaciones.

De las varias fallas generadoras de sismos en el Golfo, las más cercanas son las denominadas P. Nolasco y Tiburón, que se localizan aproximadamente a unos 15 km y 30 km, respectivamente, al occidente de la Ciudad de Guaymas.

Existe una gran cantidad de incertidumbres en la evaluación del movimiento sísmico en lo que puede generar en un sitio en particular y, principalmente, estas estimaciones repercuten en la evaluación de la peligrosidad sísmica del lugar.

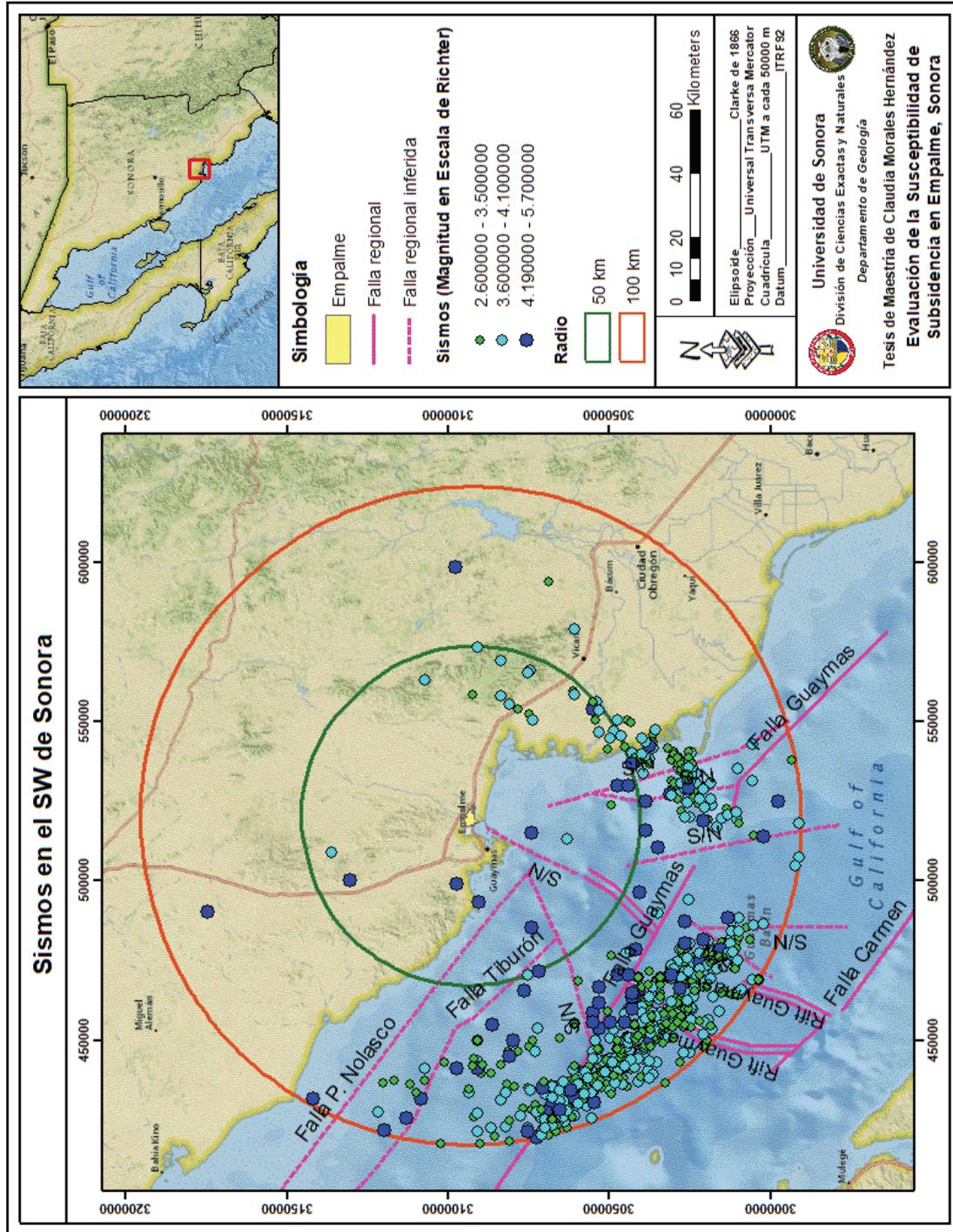


Figura 12. Mapa de sismos en el SW del Estado de Sonora donde se muestran los focos de los mismos en un radio de 50 y 100 km a partir de Empalme.

Los terremotos varían ampliamente en el tamaño o liberación de la energía, es decir, pueden ser desde pequeñas fracturas a grandes deslizamientos a lo largo de varios kilómetros en una falla.

Un terremoto pequeño que ocurre a pocos kilómetros de la superficie se puede detectar sin necesidad de instrumentos, pero un sismo grande que ocurra a muchos kilómetros bajo la superficie, a veces, sólo puede detectarse con ellos. Afortunadamente, en las últimas décadas ha existido un avance en la sismología teórica y computacional que ha permitido reducir la variabilidad en la evaluación de los movimientos del terreno. El tamaño de un sismo se puede caracterizar por la intensidad, la magnitud o el momento sísmico, siendo, quizás, este último la caracterización más adecuada debido a que está relacionado directamente con el producto del área de la ruptura de la falla y el desplazamiento promedio de la misma (Somerville, 2000).

En base a la clasificación de Ramírez (2005), la porción SSW del Estado de Sonora está dividida en 3 zonas sismogénicas o áreas fuente, tomando como base la Cuenca de Guaymas, Obregón y Huatabampo, denominadas como **Zona 1**, **Zona 2** y **Zona 3**, respectivamente. Ramírez (2005) estima que no es conveniente considerar fuentes puntuales, sino fuentes con una actividad sísmica difusa, ya que los focos de sismos están generalmente asociados a sistemas de fallas.

Para la **Zona 1**, que es la más cercana al área de estudio, se obtuvo la relación de recurrencia a partir de los sismos registrados en el Golfo de California en el periodo comprendido entre 1964 al 2018, obteniéndose la **Tabla 1** de datos del catálogo sísmico:

Tabla 1. Datos de magnitudes de sismos de la Zona 1 cercana al área de estudio.

Magnitud	No. de Sismos	No. de Sismos: radio 0.00- 50.00 km	%; radio 0.00- 50.00 km	No. de Sismos: radio 50.01- 100.00 km	%; radio 50.01- 100.00 km
2.6 - 3.5	395	8	2	387	98
3.6 - 4.1	368	17	5	351	95
4.19 - 5.7	76	9	12	67	88
Total	839	34	4	805	96

Otro de los factores importantes a definir en la evaluación del peligro sísmico es la relación entre PGA (*Peak Ground Acceleration*), la distancia epicentral o de la distancia hipocentral y la magnitud, los cuales son estimados utilizando una función de atenuación. Esta función de atenuación es la aceleración máxima para un evento de magnitud M y una distancia hipocentral D .

Este tipo de relación nos indica que a una misma distancia hipocentral D se tendrá la misma intensidad y que a medida que esta distancia aumente, la intensidad sísmica disminuirá.

Para este estudio se utilizó la ecuación de atenuación Joyner y Boore (1981):

$$PGA = 10^{(0.249 * M - \log(D) - 0.00255 * D - 1.02)} \quad (1)$$

$$D = (E^2 + 7.3^2)^{0.5} \quad (2)$$

Donde: D es la distancia hipocentral, E es la distancia epicentral y M es la magnitud del sismo.

Aplicando la fórmula anterior para las diferentes magnitudes en distancias epicentrales de los sismos en 25 km, 50 km, 75 km y 100 km, se tienen las siguientes variaciones de PGA conforme la distancia aumenta (**Tabla 2**):

Tabla 2. Variaciones de PGA conforme a las distancias epicentrales de los sismos.

Distancia epicentral (km)	PGA							
	2.6	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	5.7
25	0.013973	0.017574	0.023409	0.031180	0.041532	0.055320	0.073685	0.082638
50	0.006237	0.007845	0.010450	0.013919	0.018540	0.024694	0.032893	0.036889
75	0.003615	0.004547	0.006057	0.008068	0.010746	0.014313	0.019065	0.021382
100	0.002347	0.002952	0.003933	0.005238	0.006977	0.009293	0.012379	0.013882

Para la evaluación del mapa de peligro para el área de estudio fue necesario la conversión de los datos de PGA a escala de intensidad de Mercalli, utilizando la ecuación de Trifunac y Brady (1975) que se expresa de la siguiente manera:

$$MMI = 1/0.3*(\log_{10}(PGA*980)-0.014) \quad (3)$$

Donde: *MMI* es la intensidad modificada de Mercalli y *PGA* es la aceleración máxima del suelo obtenida anteriormente, dando como resultado la **Tabla 3** de intensidades para las diferentes magnitudes:

Tabla 3. Tabla de intensidades para las diferentes magnitudes en la Zona 1, cercana al área de estudio, modificada de Mercalli y PGA.

Distancia epicentral (km)	MMI							
	2.6	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	5.7
25	3.7	4.1	4.5	4.9	5.3	5.7	6.2	6.3
50	2.6	2.9	3.3	3.7	4.2	4.6	5.0	5.2
75	1.8	2.1	2.5	3.0	3.4	3.8	4.2	4.4
100	1.2	1.5	1.9	2.3	2.7	3.2	3.6	3.7

Por lo tanto, la tabla de intensidades de Mercalli quedaría de la siguiente manera (**Tabla 4**):

Tabla 4. Tabla de Intensidades de Mercalli cercana al área de estudio.

Distancia epicentral (km)	MMI							
	2.6	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	5.7
25	IV	IV	V	V	V	VI	VI	VI
50	III	III	III	IV	IV	V	V	V
75	II	II	III	III	III	IV	IV	IV
100	I	II	II	II	III	III	IV	IV

Con esta información obtenida, se elaboraron los mapas de intensidades para sismos con magnitudes de 2.6, 3.0, 4.5 y 5.7, a una distancia entre 50.01 km y 100 km de Empalme, mostrando los posibles efectos del sismo en zonas habitadas o estructuras de vital importancia (**Figuras 13-16**).

Asimismo, se realizó un mapa más de intensidades para un sismo con magnitud de 4.7 a una distancia entre 0 km y 50 km (**Tabla 5**) de Empalme para observar los posibles efectos de éste en zonas habitadas (**Figura 17**).

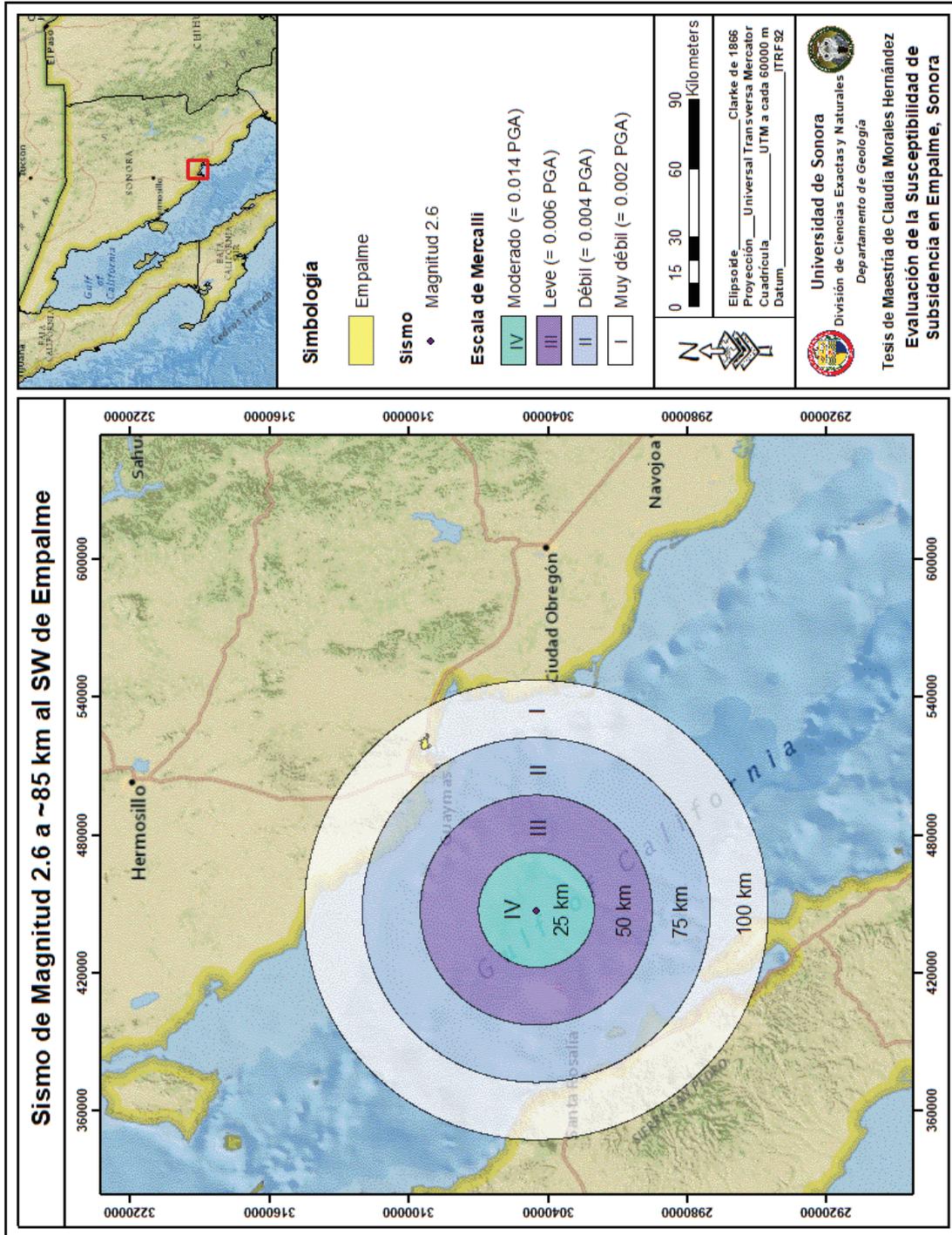


Figura 13. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 2.6.

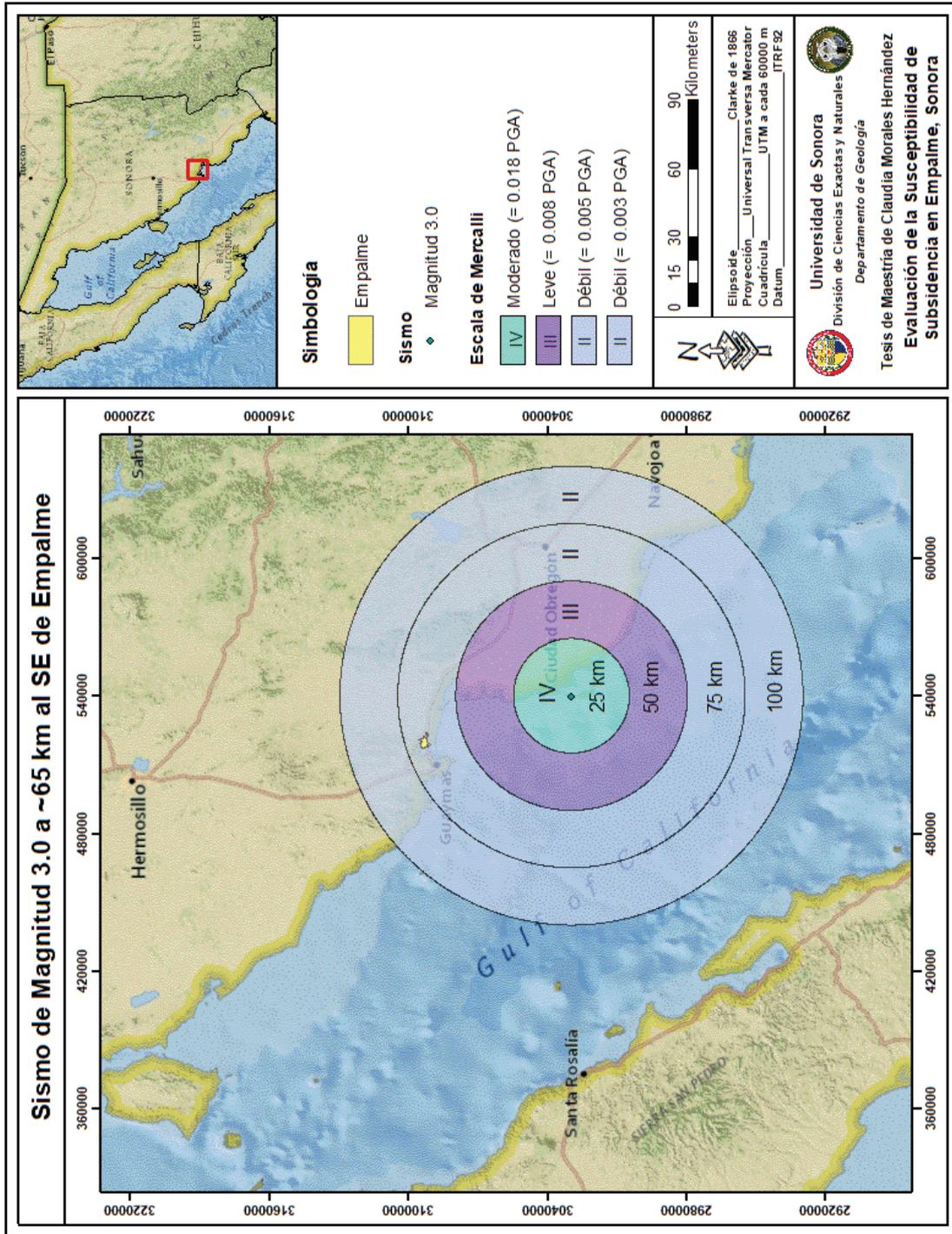


Figura 14. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 3.0.

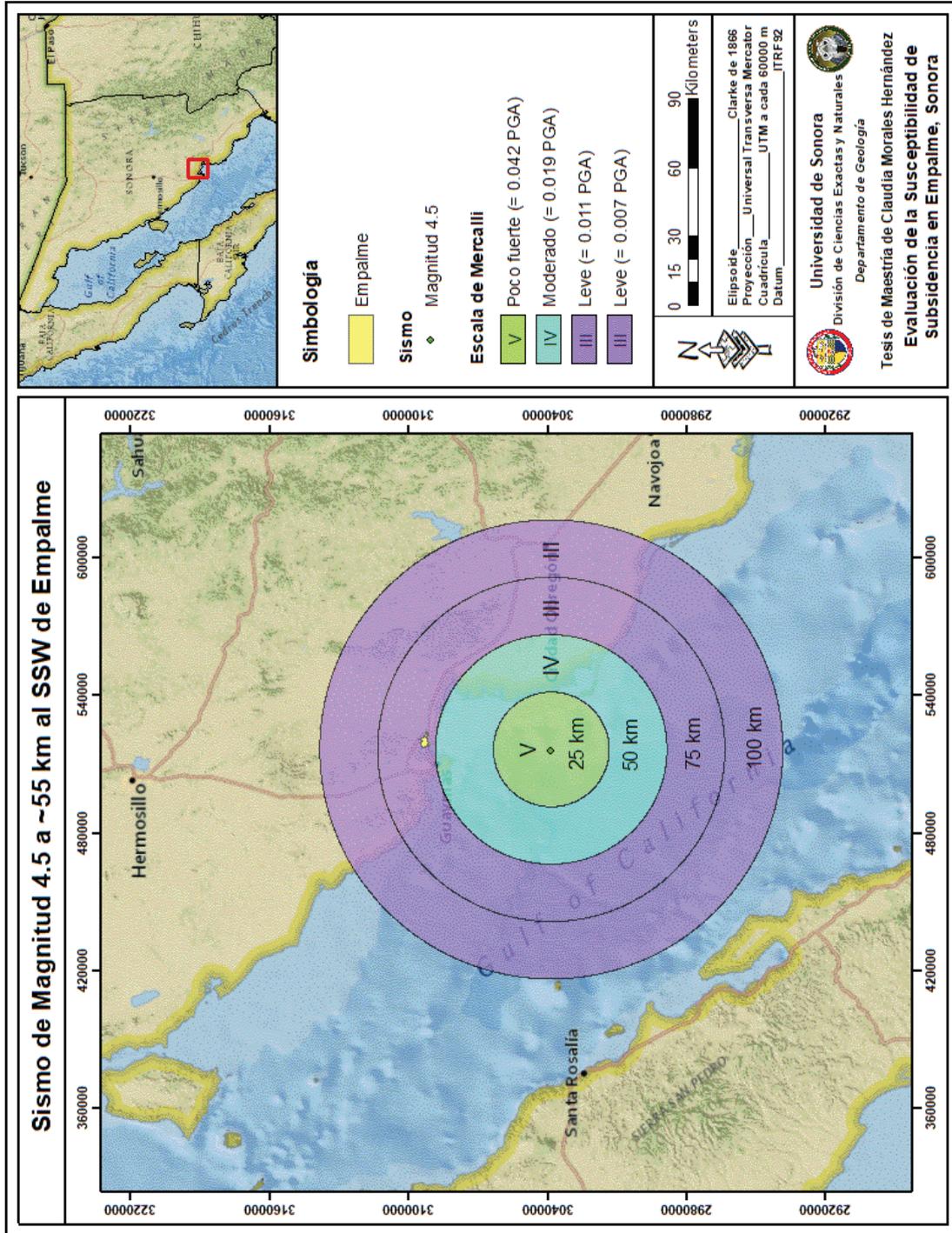


Figura 15. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 4.5.

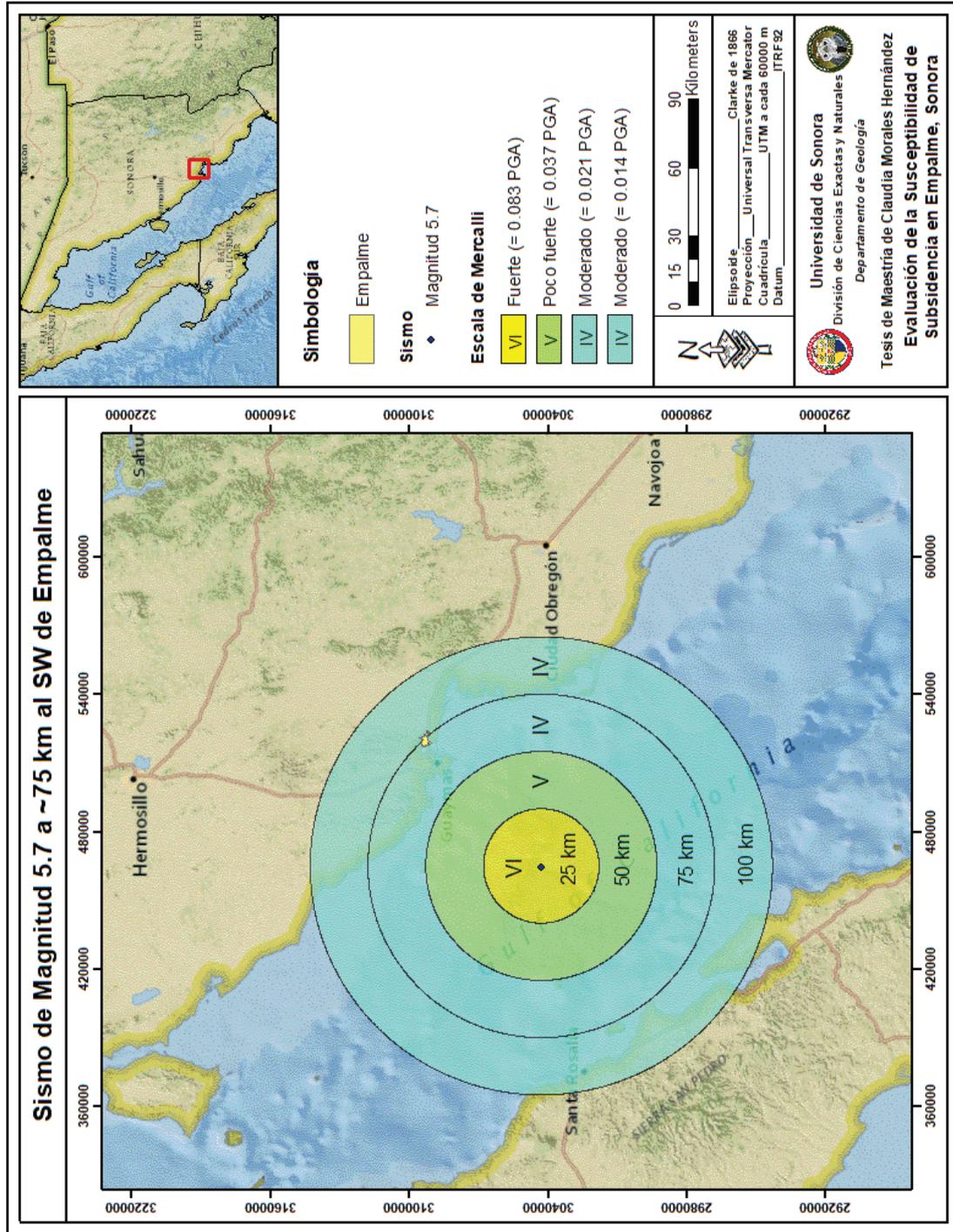


Figura 16. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 5.7.

Tabla 5. Tabla de variaciones de PGA y de intensidades de Mercalli para un sismo de 4.7 cercano al área de estudio.

Distancia epicentral (km)	PGA		MMI		MMI
	4.7		4.7		4.7
25	0.04657792		5.5		V
50	0.02079209		4.3		IV
75	0.0120514		3.5		IV
100	0.00782469		2.9		III

3.2. Análisis de Geología Estructural Local

La apertura del Golfo de California se inició durante el Mioceno medio al superior (Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda, 2000; Stock, 2000; Aragón y Martín, 2007; Helenes *et al.*, 2009) y creó una serie de cuencas transtensionales a lo largo del límite entre las placas de Norteamérica y Pacífico, lo que dio lugar a la formación de una serie de rifts a lo largo del Golfo de California.

El sistema de rifts del norte del Golfo de California consiste en una serie de fallas que acomodan tanto deformación normal como de rumbo.

Este evento distensivo miocénico trae como consecuencia bloques levantados y el origen de grandes fosas tectónicas, las cuales fueron rellenadas por sedimentos clásticos (o siliclásticos), ahora caracterizados por conglomerados, areniscas y locales lentes de basaltos, a diferentes escalas de tiempo.

La cronoestratigrafía de estas cuencas indica que la subsidencia inició en el Mioceno medio (~15 Ma) y la deformación que se produjo en el Golfo de California se caracteriza por tener una fuerte componente lateral derecha que resulta en una apertura oblicua.

La orientación de las estructuras extensionales del Cenozoico Superior en las regiones costeras del Golfo de California es generalmente NNW-SSE (Dokka y Merriam, 1982; Henry, 1989; Stock y Hodges, 1989).

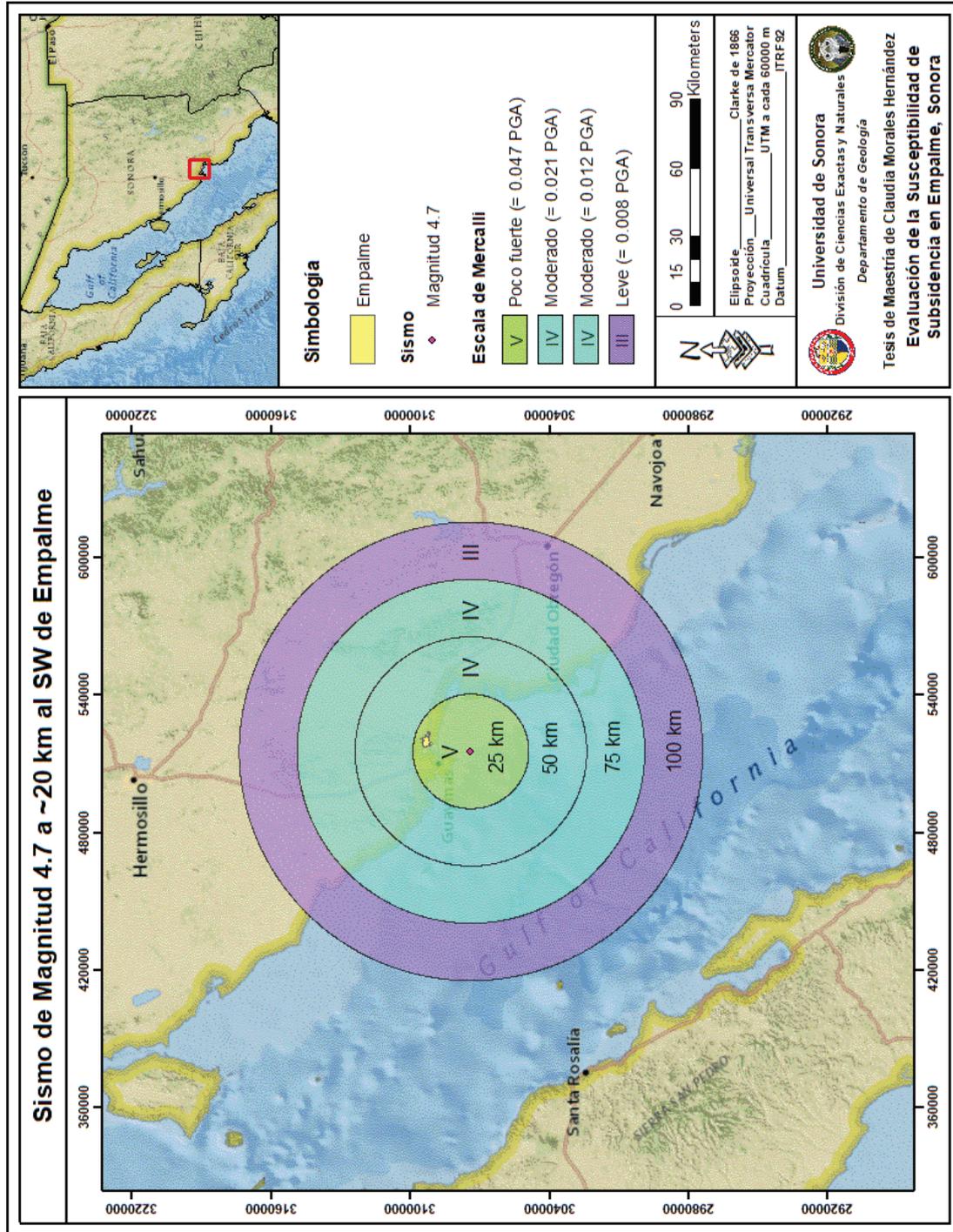


Figura 17. Mapa de propagación de onda sísmica (aceleración del suelo) para un sismo con magnitud 4.7.

Las áreas en donde se localizan dichas estructuras que sugieren una deformación extensional más joven que 12 Ma (Gans *et al.*, 2003), se restringen a una franja paralela a la costa actual del Golfo de California de aproximadamente 100 km de ancho, lo cual corresponde a la verdadera extensión geográfica de la Provincia Extensional del Golfo de California en Sonora (Stock y Hodges, 1989; Roldán *et al.*, 2004; Fletcher *et al.*, 2007), la cual se traslapa con la Provincia del *Basin and Range* del sur de California y noroeste de México, donde la mayor parte de la deformación extensional es más antigua (**Figura 9**).

En el área del Graben de Empalme, se han identificado dos eventos extensionales con características geométricas distintivas:

- El primero se relaciona al evento de Cuencas y Sierras (*Basin and Range*) y se caracteriza por fallas normales de rumbo general N 30°-40° W, que afectan a la sección volcánica y cuyas edades se estiman entre 24 y 11 Ma (Mora y McDowell, 2000).
- El segundo evento tectónico está relacionado a la apertura del golfo y se caracteriza por fallas con orientación N-S que presentan un desplazamiento a rumbo sobrepuesto a movimientos de tipo normal.

El área de estudio se localiza en una región donde las rocas volcánicas cenozoicas buzan principalmente hacia el oriente, con rumbo general N-S, y están cortadas por fallas N-S que delimitan el Graben de Empalme (Roldán *et al.*, 2004). En su parte norte, existe una zona de transferencia y los echados de las rocas volcánicas buzán hacia el oeste (Stewart y Roldán, 1994).

Roldán *et al.* (2004) comentan que con un mayor detalle han observado que en la Sierra de Santa Úrsula las rocas más antiguas buzán hacia el este, pero que las edades más jóvenes que 12 Ma tienen una inclinación al oeste y que los derrames de basalto, en el borde occidental de la Sierra del Bacatete, presentan un echado hacia el oeste, es decir, hacia el graben.

Lo anterior se ha interpretado como un cambio geométrico del patrón de fallas que controla el graben después de 12 Ma, edad que corresponde al fin de la subducción en la parte sur de Baja California (Roldán *et al.*, 2004).

Roldán *et al.* (2004) en su trabajo proponen el uso del término “Graben de Empalme” para designar a una estructura extensional compleja, que corresponde al rasgo morfológico de 50 km

de largo y una anchura de 25 km, conocido como Valle de Empalme-Guaymas, el cual está limitado por dos sistemas de fallas normales principales, con orientación N-S. Estas fallas normales afectan a los basaltos toleíticos del Basalto Empalme y a los diques del Granófiro Ortiz.

Aunque las fallas mayores son inferidas, la presencia de otras fallas secundarias es evidente por las diferencias de elevación de las mesetas de basalto de hasta 200 m, además de inclinaciones en diferentes direcciones en ambos bordes del graben (Roldán *et al.*, 2004).

En el borde oriental del graben, así como en la Sierra de Santa Úrsula y la porción occidental de la Sierra del Bacatete, se reconocieron fallas de desplazamiento lateral derecho con rumbo N-S (Roldán *et al.*, 2004). Las fallas identificadas son laterales, aunque en algunos planos de falla se observaron también estrías de fallas oblicuas (20° - 30° con la horizontal), particularmente en el Arroyo de los Pilares, a 1 km del rancho del mismo nombre (Roldán *et al.*, 2004; Vargas-Navarro, tesis de maestría en preparación).

Los derrames de basalto son las rocas más jóvenes afectadas por el fallamiento normal en el área.

Con base en la fotointerpretación de imágenes satelitales, se llevó a cabo un análisis estructural regional, en escalas 1:20,000 y 1:100,000, en el cual se interpretaron, como reportan otros autores, fallas de tipo normal con orientación NNE-SSW y de desplazamiento lateral con direcciones generales NE-SW y NW-SE, asociadas a eventos distensivos o de deslizamiento extensional, así como lineamientos menores o secundarios (**Figura 18**). En total se identificaron 378 lineamientos, de los cuales el 21% pertenece a las fallas normales, el 23% a fallas de desplazamiento lateral y el 56% a lineamientos menores (fracturas).

De manera general, se puede hacer una división de estas fallas por su orientación a gran escala en tres grupos principales:

1. **Fallas normales con rumbos NNE-SSW:** A este grupo de fallas normales se le puede dividir en dos familias de acuerdo con los datos obtenidos de las diferentes lineaciones observadas en las imágenes satelitales del área de estudio (**Anexo 2**): la primera hacia el NNE, con un porcentaje del 69%, y la segunda hacia el NNW, con el 31% (**Figura 19**).

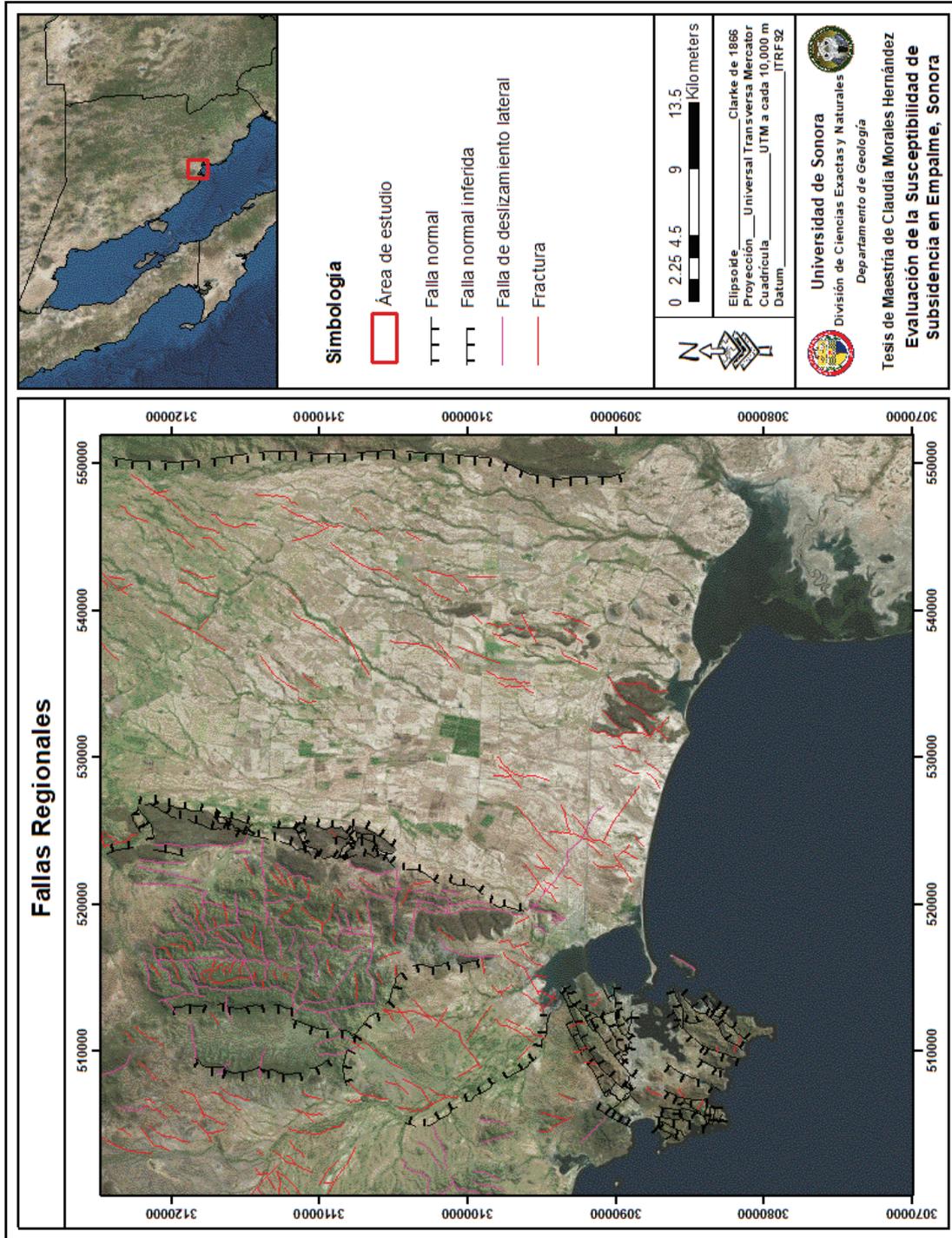


Figura 18. Mapa estructural regional de los valles de San José de Guaymas y de Empalme (adaptado de Roldán et al., 2004, y de Vega et al., 2004).

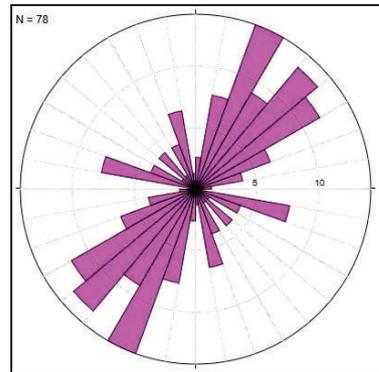


Figura 19. Gráfica mostrando las direcciones preferenciales del grupo de fallas normales con rumbos NNE-SSW.

Las fallas normales casi N-S se pueden observar en los flancos del Valle Empalme-Guaymas, al occidente de la Sierra La Ventana (o Sierra Santa Úrsula) y hacia el SSW de la Ciudad de Guaymas. Roldán *et al.* (2004) y Vega *et al.* (2004) comentan en sus estudios que dichas estructuras presentan rumbos generales de NW 30° hasta NE 30° y provocan el basculamiento de las secuencias volcánicas terciarias, produciendo cuencas de semigraben escalonadas.

Así mismo, Vega *et al.* (2004) mencionan que las fallas con rumbos NE 32°-82° se encuentran principalmente en los alrededores de Guaymas y, en menor densidad, en el flanco oriente de la Sierra de Santa Úrsula; esto concuerda con lo que se observó en las imágenes satelitales. Asociada a estas estructuras se interpreta un lineamiento semicircular de tipo caldera, la cual es asimétrica con elongación aproximada de NE 45°; controla la estratificación y relieve del Cerro El Vigía y parece continuar hacia los cerros Lomas de Cortés y El Potrerito (Vega *et al.*, 2004). Una parte de esta estructura no aflora al ser cortada por fallas posteriores con rumbo aproximado NW 50°.

Los rumbos de las fallas mayores en el Cerro El Vigía varían de NE 33°-82° en el oriente a NE 58°-64° en el poniente; se trata de una serie de fallas paralelas cóncavas hacia la Ciudad de Guaymas, lo que indica que los bloques caen hacia el sureste (Vega *et al.*, 2004). Pueden resultar complicaciones locales en la estructura debido a que recorta fallas normales anteriores con rumbo NW y a su vez es cortada por fallas normales con dirección NE y que buzcan hacia el NW (Vega *et al.*, 2004).

Vega *et al.* (2004) también sugieren que esta estructura circular influye en el afloramiento de un granitoide hipabisal, cuyo emplazamiento puede compensar la subsidencia de bloques y aún levantar las capas sobre él.

Las fallas con direcciones NW 39°-80° también se pueden observar al sur del Cerro El Vigía y al suroeste de la Ciudad de Guaymas. Hacia el Valle de San José de Guaymas, también se identificó una estructura semicircular con una dirección general de NW 43° y NW 42° al norte y sur, respectivamente, del mismo.

2. **Fallas de deslizamiento lateral:** Este sistema de fallas está conformado por estructuras con rumbos generales NNE, con un porcentaje del 61%, y NNW, con el 31%, de acuerdo con los datos obtenidos de las imágenes satelitales del área de estudio (**Anexo 3; Figura 20**).

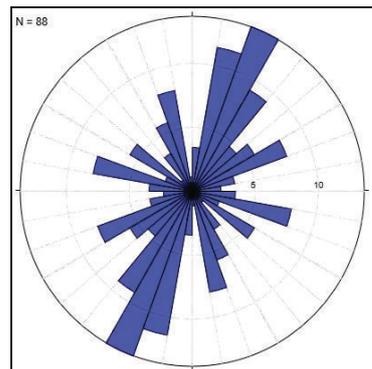


Figura 20. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales del grupo de fallas de deslizamiento lateral.

Estas fallas las podemos observar principalmente en las sierras de Santa Úrsula y La Ventana y al SW del Valle de San José de Guaymas.

En este sistema de fallas, las estructuras con orientación hacia el NNW se pueden asociar con el sistema de grandes fallas que conforman al Sistema de Fallas del Golfo de California, donde se desarrolla un régimen tectónico transtensional.

3. **Fracturas:** En este grupo se integraron todos aquellos lineamientos menores o secundarios que se observaron en las imágenes satelitales, ubicados, la mayoría, en los valles de San José de Guaymas y Empalme-Guaymas y, en menor proporción, en la

Sierra de Santa Úrsula (o La Ventana), alrededores de Guaymas y al oeste de la Sierra La Ventana.

De acuerdo con el análisis de los datos obtenidos de las imágenes satelitales del área de estudio, los datos obtenidos de las diferentes estructuras observadas (**Anexo 4**), los rumbos preferenciales para este grupo se tienen, en primer lugar, hacia el NE, con un porcentaje del 77%, y en segundo lugar hacia el NW, con un 23% (**Figura 21**).

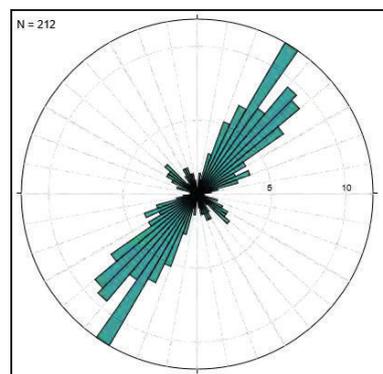


Figura 21. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales del grupo de fracturas.

En este grupo de lineamientos menores, o fracturamientos, las estructuras de orientación NE, posicionadas sobre los valles de Empalme-Guaymas y San José de Guaymas, son las que más concuerdan con la dirección NE del grupo de enjambres de focos sísmicos ubicados al SE de la Ciudad de Empalme, Sonora (**Figuras 12 y 18**).

3.3. Análisis de Tomografía Eléctrica de Resistividad

Existen muchos métodos en estudios eléctricos; algunos usan el campo natural de la Tierra (potencial natural), mientras que otros requieren la introducción de un campo generado artificialmente inyectado al subsuelo (resistividad eléctrica y polarización inducida).

Aproximadamente en la década de 1990 surge la técnica conocida como tomografía eléctrica (2D y 3D) superficial, con la necesidad de tener una imagen de distribución exacta de resistividades y apegarse más a la geología, en ocasiones compleja, como lo es la caracterización de fallas y fracturas.

La Tomografía Eléctrica consiste en obtener una serie de medidas de resistividad aparente con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos; y, posteriormente, ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor, de tal forma que el resultado final será una sección o corte del subsuelo a varios niveles de profundidad. La característica física que utiliza es la resistividad, conocida también como resistencia específica de los diferentes materiales. En superficie se efectúan una serie de medidas que permiten obtener resistividades aparentes, en función de la línea de emisión, que es otro parámetro lineal.

De este modo, considerando el tipo de agua que llena los poros del material que compone el terreno y la resistividad del agua, es posible una clasificación estimativa de los terrenos de acuerdo a su resistividad, según se muestra en la **Tabla 6**:

Tabla 6. Resistividades de los diferentes tipos de terreno.

Tipo de terreno	ρ (ohm-metro)
Terrenos vegetales húmedos	10 – 50
Arcillas, gredas, limos	20 – 60
Arenas arcillosas	80 – 120
Fangos, turbas	150 – 300
Arenas	250 – 500
Suelos pedregosos	300 – 400
Rocas	1,000 – 10,000
Concreto húmedo	100 – 240
Concreto seco	10,000 – 50,000

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica una técnica de inversión (Loke, 2004).

3.3.1. Equipo Utilizado

El equipo que se utilizó para el levantamiento de los datos geofísicos en la parte norte de la Ciudad de Empalme fue:

- Electrodo inteligentes (**Figura 22**): 40 para cada perfil, con una separación de 5 m entre nodo.
- Cable con conectores integrados (**Figura 22**): de gran longitud con conexiones cada cierto intervalo (en este caso, cada 5 m) para conectar los electrodos inteligentes.
- Computadora portátil (**Figura 23**): con el programa de adquisición ya instalado, para el envío y recepción de: energía eléctrica para la medición de resistividad en el suelo, número de medidas a realizar, tipo de dispositivo electródico (Wenner o Schlumberger), número y espaciado de electrodos inteligentes, y número de niveles de profundidad.
- Resistímetro (**Figura 23**): el cual ejecuta de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminadas, verifica el buen estado de las conexiones y almacena todos los valores de resistividad.
- Equipo fuente de alimentación de todo el sistema (**Figura 24**).
- Una Base de Estación Total del GPS (**Figura 25**), la cual recibe información adicional transmitida por los satélites GNSS en tiempo real.
- Un radio (**Figura 25**).
- Un Equipo Colectora (**Figura 26**) que recoge información satelital y topográfico.

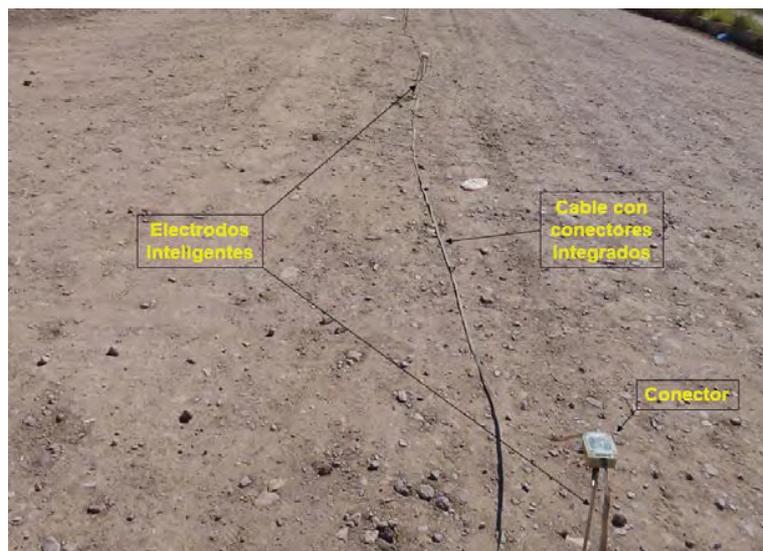


Figura 22. Electrodo inteligentes y cable con conectores integrados con una separación entre dichos electrodos de 5 m cada uno.



Figura 23. Equipo que se utilizó para el envío y recepción de energía eléctrica para la medición de los cambios de resistividad en el subsuelo: resistímetro (derecha) y laptop (izquierda).



Figura 24. Equipo fuente de alimentación de todo el sistema.



Figura 25. Base de la Estación Total del GPS (derecha) y el radio (izquierda).



Figura 26. Equipo Colectora.

3.3.2. Adquisición de los Datos de Campo

El método de la Tomografía Eléctrica de Resistividad puede dividirse en dos etapas principales: 1) la toma (o adquisición) de datos en campo y 2) el procesamiento (o inversión) de los mismos, lo cual da como resultado una imagen eléctrica (Tejero *et al.*, 2002).

Para la adquisición de los datos geofísicos (tomografía eléctrica) en campo, se realizó lo siguiente:

Se hizo una salida a campo por 2 días consecutivos para levantar los datos geofísicos (tomografía eléctrica) de 3 perfiles (**Figura 27**) que se planearon en las ubicaciones a continuación descritas:

- ❖ **Perfil 1:** Panteón Municipal; tiene una longitud de 200 m, en dirección W-E (**Figura 28**), utilizando una configuración electródica del dispositivo Wenner, en la cual se emplearon 40 electrodos inteligentes con una separación de 5 m entre nodo, con una profundidad aproximada de 55 m.
- ❖ **Perfil 2:** Calle Guillermo Prieto, entre la Avenida Francisco Villa y callejón sin nombre, en la Colonia Juárez, con una longitud de 200 m, de dirección N-S (**Figura 29**), utilizando una configuración electródica del dispositivo Wenner; en donde se utilizaron 40 electrodos inteligentes con una separación de 5 m entre nodo, y obteniendo una profundidad aproximada de 55 m.
- ❖ **Perfil 3:** Avenida Vicente Guerrero, entre las calles Miguel Hidalgo y Gómez Farías, en la Colonia Juárez; tiene una longitud de aproximadamente 225 m, con dirección W-E (**Figura 30**), utilizando las configuraciones electródicas de los dispositivos Wenner y Schlumberger y 45 electrodos inteligentes con una separación de 5 m entre nodo, alcanzando una profundidad aproximada de entre 55 y 60 m.

Para el desarrollo de estas secciones, se posicionó la Base de la Estación Total del GPS en el Panteón Municipal (Perfil 1) y en la Calle Guillermo Prieto (Perfiles 2 y 3), para comenzar a recibir la información adicional transmitida por los satélites GNSS en tiempo real, como son los puntos de geoposicionamiento (**Figura 25**), junto con el radio.

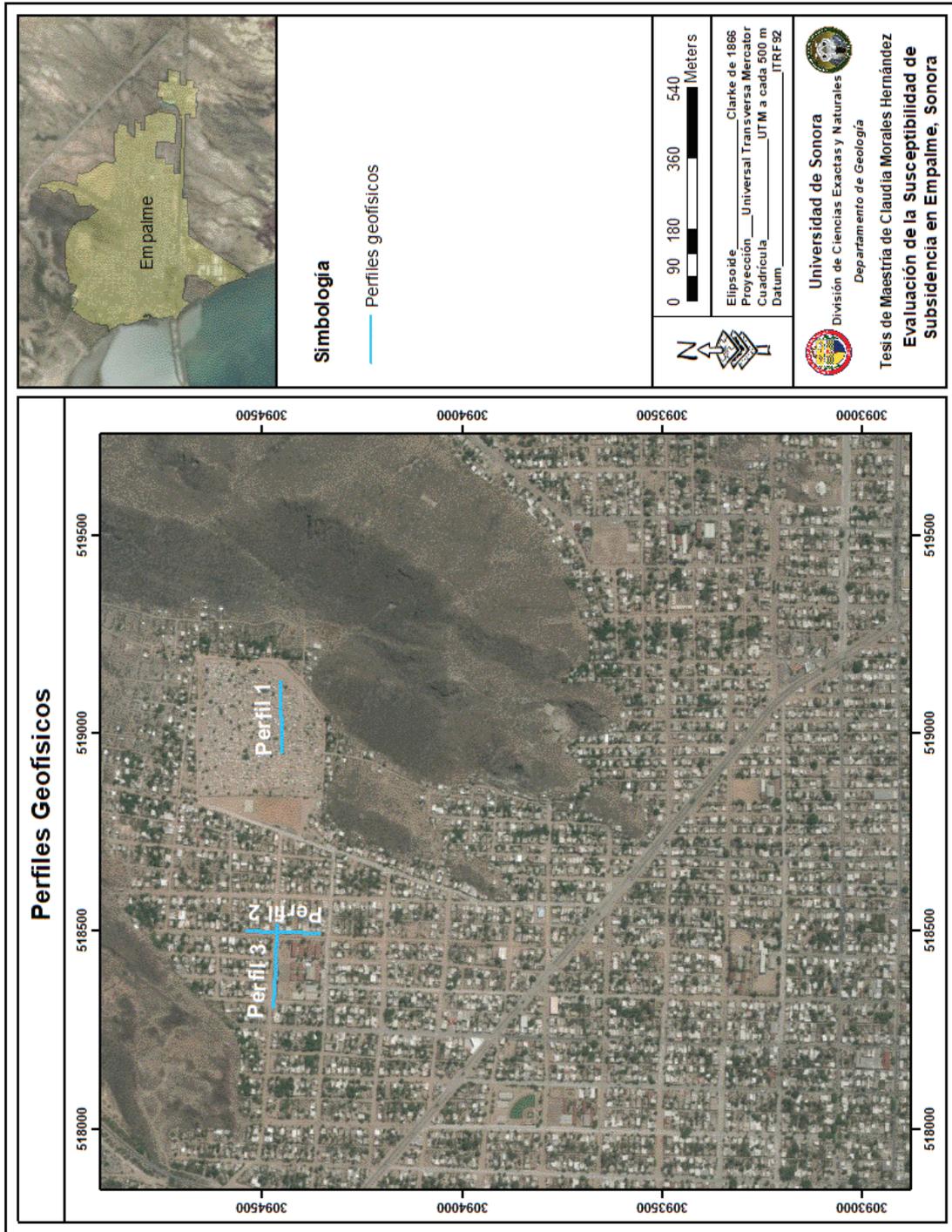


Figura 27. Levantamiento geofísico (tomografía eléctrica de resistividad) en la parte norte de Empalme, Sonora, donde se realizaron 3 perfiles: Perfil 1 = Panteón Municipal; Perfil 2 = Calle Guillermo Prieto, entre la Avenida Francisco Villa y calleión sin nombre; v Perfil 3 = Avenida Vicente Guerrero. entre las calles Miquel Hidalgo v Gómez Farias.

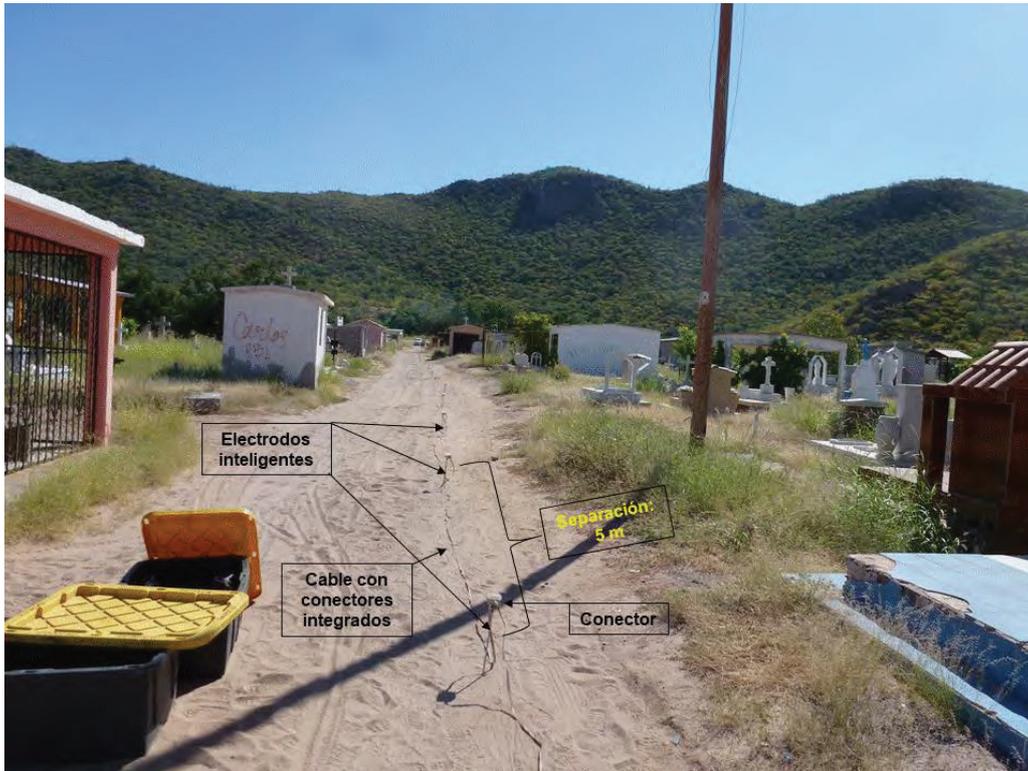


Figura 28. Perfil 1: Panteón Municipal, con vista hacia el este, con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 200 m, aproximadamente.

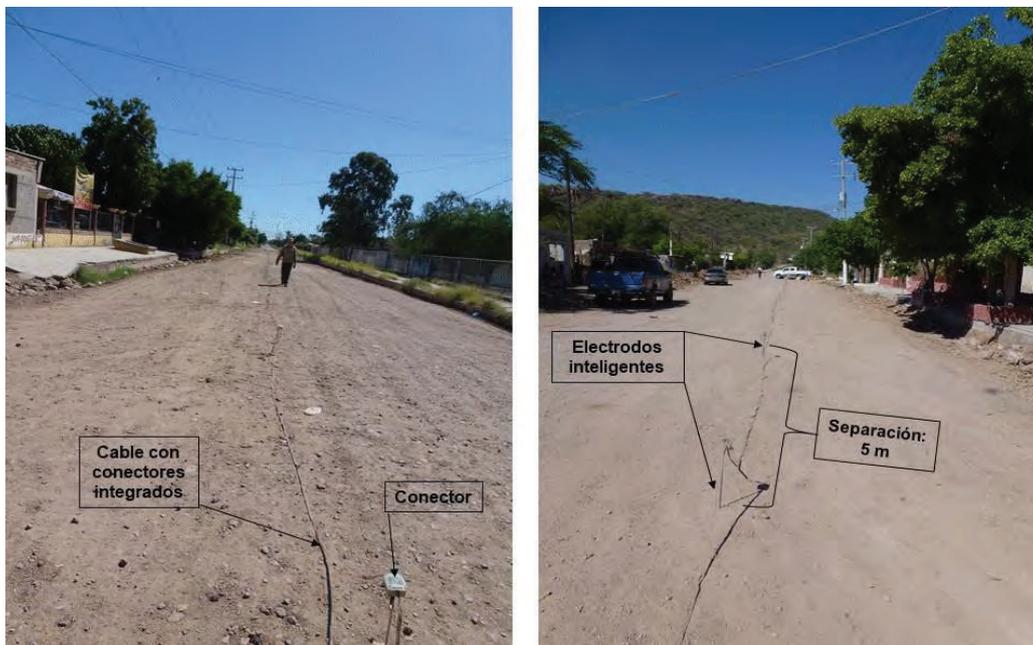


Figura 29. Perfil 2: Calle Guillermo Prieto, con vista hacia el sur (lado izquierdo) y norte (lado derecho), con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 200 m, aproximadamente.



Figura 30. Perfil 3: Avenida Vicente Guerrero, con vista hacia el oeste, con una separación entre electrodos inteligentes de 5 m cada uno y una longitud de 250 m, aproximadamente.

Se colocaron los electrodos inteligentes sobre la superficie del terreno de forma equiespaciada, es decir, a cada 5 m, intentando siempre que formarán una línea recta, clavándolos para garantizar un buen contacto electrodo-suelo (resistencia de contacto baja). A continuación, se les colocó el cable con conectores integrados.

Se configuraron las variables para construir el perfil 2D, tanto en la computadora portátil como en el propio resistímetro (**Figura 23**), el tipo de dispositivo, número de electrodos, abertura entre electrodos y número de niveles.

Antes de iniciar las mediciones, mediante el resistímetro se procede a la verificación de que todas las conexiones (electrodos inteligentes-cable) funcionan correctamente, y que la resistencia de contacto entre electrodo-suelo sea lo suficientemente baja (menores a 100 ohm-m) para garantizar buenos resultados. Si estos valores son superiores, generalmente del rango entre 500 y 1,000 ohm-m, se requiere de hacer penetrar un poco más los electrodos inteligentes o, en su caso, humedecer el terreno para mejorar la conductividad.

Concluida la configuración y verificación, se transfieren las especificaciones anteriormente programadas al resistímetro para que éste comience a realizar automáticamente toda la secuencia de mediciones prefijada, con el objetivo de obtener una sección 2D de resistividades aparentes.

Este proceso tardó alrededor de 3 a 4 horas por sección.

Mientras se ejecutaba la secuencia de mediciones para adquirir la sección 2D del primer perfil, con el equipo Colectora se geoposicionó cada electrodo inteligente y se recorrió todo el perfil con una libreta de campo para anotar en ella todo aquel material que se encontrará tanto del lado derecho como del lado izquierdo del perfil que, en un momento dado, pudiera afectar para la lectura de las mediciones.

Al término de las mediciones, se movió la Base de la Estación Total del GPS del Panteón Municipal a la Calle Guillermo Prieto para obtener la nueva información adicional transmitida por los satélites GNSS en tiempo real de los nuevos puntos de geoposicionamiento para los perfiles 2 y 3. Para dichos perfiles se realizó el mismo procedimiento que en el perfil 1.

Por último, terminado todo el proceso de captura de datos, la información es almacenada digitalmente dentro del resistímetro y, posteriormente, se exporta a la computadora portátil (o laptop) con el fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa de inversión RES2DINV.

3.3.3. Inversión de los Datos

La finalidad de la inversión de los datos provistos por una Tomografía Eléctrica de Resistividad es hallar un modelo, es decir, una representación idealizada de la distribución de resistividades de una sección del subsuelo consistente con las mediciones superficiales de tensión eléctrica (Loke, 1996-2002). Su objetivo de llevar a cabo la inversión es obtener un modelo 2D de resistividades reales a partir de la sección de resistividades aparentes 2D adquirida. Este modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la tierra y los parámetros de dicho modelo son cantidades físicas que se obtienen de los datos observados.

El conjunto de datos que se forma de una pseudosección se emplea para generar imágenes eléctricas 2D. Todo método de inversión procura determinar un “modelo idealizado” del subsuelo que reproduzca los parámetros medidos de manera adecuada.

Dado que la señal al tomar las mediciones puede sufrir alteraciones (ruido), es importante un procesamiento de los datos, en donde se hace un mejoramiento manual de la señal (control de calidad de los datos) al eliminar puntos anómalos. La depuración de estos puntos anómalos se hizo con el programa **RES2DINV**. El objetivo fue tener una imagen con menos ruido.

A partir de las mediciones en campo, se obtuvieron diferentes datos de resistividad que fueron procesados en este programa, el cual utiliza la técnica de mínimos cuadrados para invertir todos los datos recabados y obtener modelos en 2D, los cuales son configurados en forma de pseudosecciones.

Los resultados de estos datos procesados es una tomografía con 3 pseudosecciones para cada línea de resistividad. En la pseudosección superior se muestra la ubicación de los puntos medidos en campo que corresponden a la resistividad aparente medida; la siguiente es la pseudosección de resistividades aparentes, que son los datos calculados mediante un algoritmo (el programa **RES2DINV** utiliza el algoritmo de Loke y Barker, 1995); y la última es la distribución de resistividades real con respecto a la profundidad verdadera, generada a través de una inversión (**Figuras 31 y 32**).

Para los perfiles 1 y 2, se procesaron los datos con el arreglo geofísico Wenner (**Figuras 31 y 32**) y para el Perfil 3, se realizaron los datos con los arreglos geofísicos Wenner y Schlumberger (**Figuras 33 y 34**).

Aunque también la topografía puede tener una influencia en los datos, es importante mencionar que, para este estudio, no es significativa, ya que las variaciones son pequeñas siendo el área casi plana; sin embargo, si no fuera así, el programa compensa la diferencia de elevación.

3.3.4. Resultados

Para la interpretación de las estructuras en el subsuelo a partir de este método es importante identificar interrupciones laterales y/o verticales bruscas en la continuidad de las resistividades.

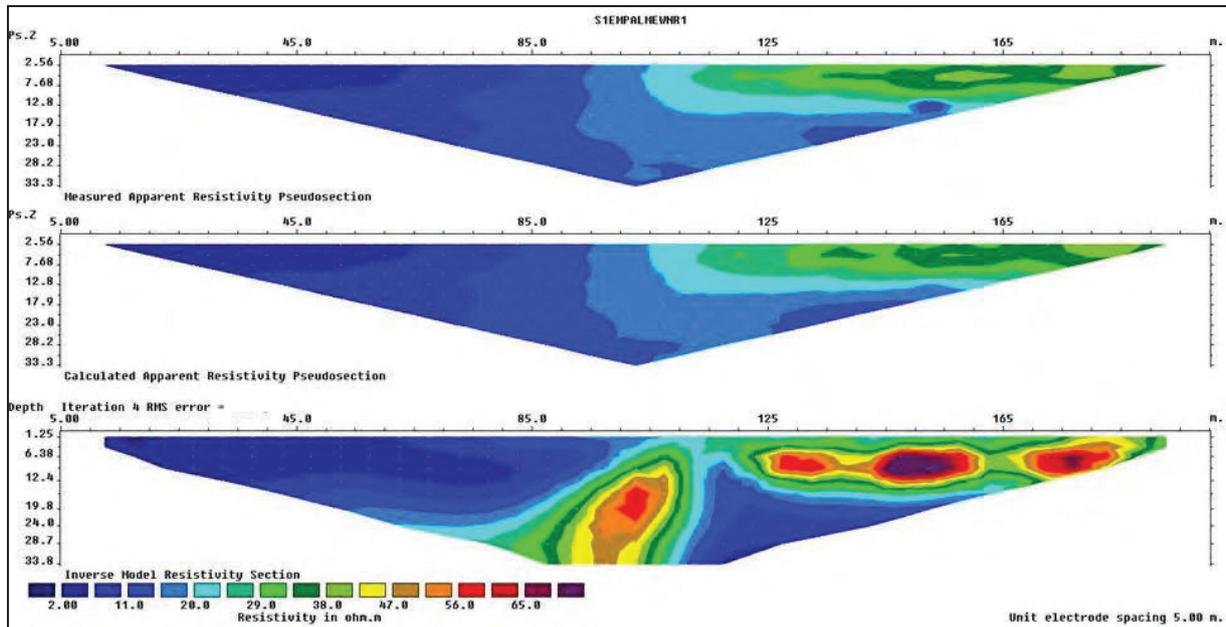


Figura 31. Tomografía de la pseudosección del Perfil 1 con arreglo Wenner. a) Arriba: pseudosección con los puntos medidos (o pseudosección de resistividades aparentes); b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) abajo: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.

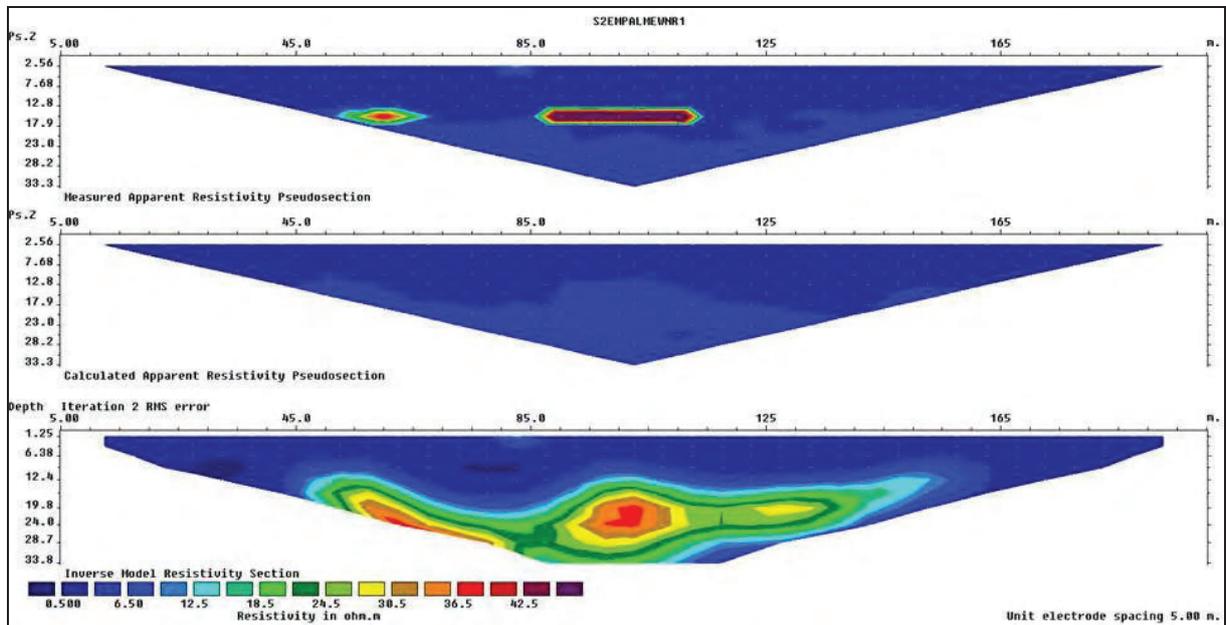


Figura 32. Tomografía de la pseudosección del Perfil 2 con arreglo Wenner. a) Superior: pseudosección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudosección de resistividades aparentes calculadas; c) inferior: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.

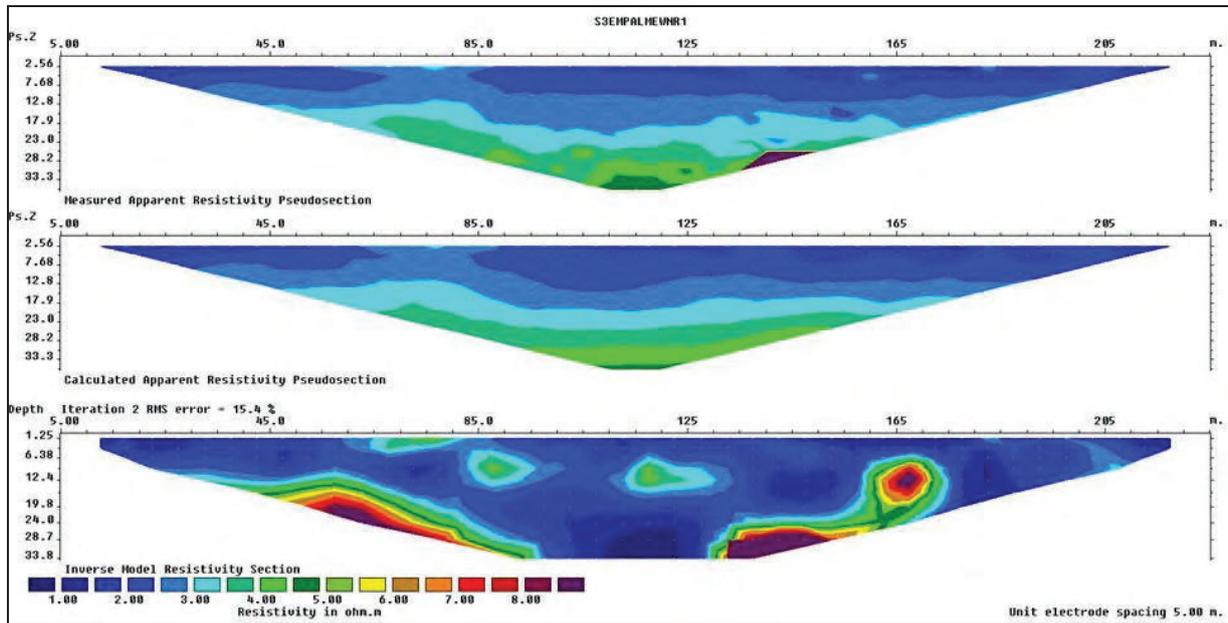


Figura 33. Tomografía de la pseudo sección del Perfil 3 con arreglo Wenner. a) Superior: pseudo sección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudo sección de resistividades aparentes calculadas; c) inferior: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.

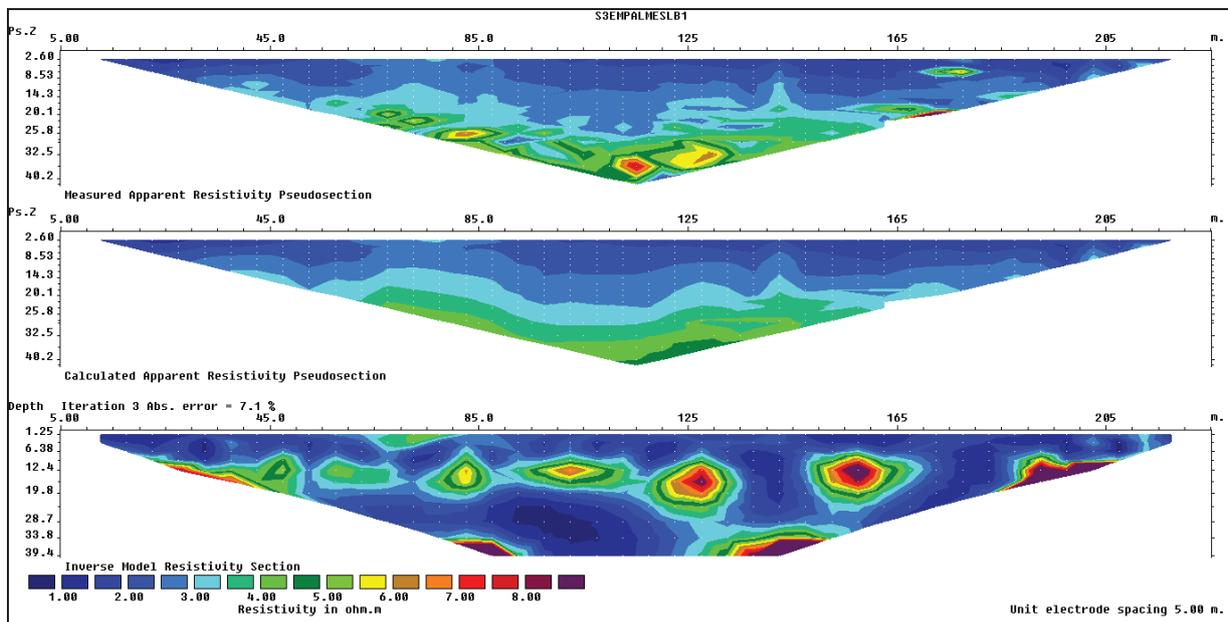


Figura 34. Tomografía de la pseudo sección del Perfil 3 con arreglo Schlumberger. a) Arriba: pseudo sección de resistividades aparentes; b) en medio: pseudo sección de resistividades aparentes calculadas; c) abajo: sección del modelo de resistividad. El color azul indica resistividades bajas y el morado, resistividades altas.

Para el caso de los perfiles 1 y 3, las estructuras interpretadas tienen una correspondencia con las observadas en superficie. Esto permite asegurar que el reconocimiento de las variaciones de resistividad sea atribuible a la presencia de las fallas cercanas a la superficie.

Perfil 1: Panteón Municipal

El modelo de resistividad de este perfil muestra 3 unidades: una de baja resistividad hacia el lado oeste, una de mediana resistividad en medio y una de alta resistividad al este (**Figura 35**), presentando valores de <20 ohm-m, entre 20-52 ohm-m y >52 ohm-m, respectivamente, interpretando estas unidades como sedimentos arcillosos y areno-arcillosos.

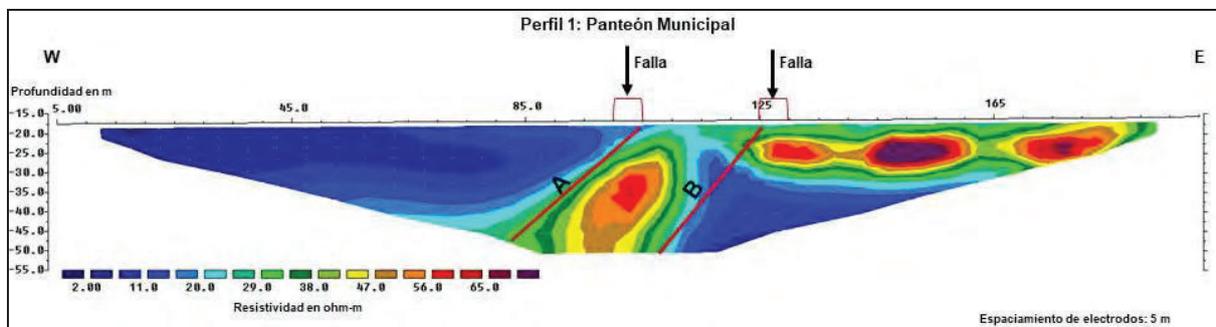


Figura 35. Modelo de resistividad del Perfil 1: Panteón Municipal. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. Las líneas rojas (A, B) indican los planos de falla interpretados en este trabajo.

Superficialmente en este perfil se observaron 2 fallas afectando a las tumbas del lugar (**Figuras 36 y 37**). Dichas fallas intersectan el perfil del modelo de resistividad a los 100-105 m y 125-130 m de longitud, respectivamente, concordando con los escarpes que se interpretaron en este modelo (**Figura 35**, líneas rojas).



Figura 36. Falla B en superficie afectando tumbas. Nótese el fracturamiento que presenta una de las tumbas (líneas rojas).



Figura 37. Falla A en superficie afectando tumbas. Nótese el fracturamiento que presenta una de las tumbas (líneas rojas).

Perfil 2: Calle Guillermo Prieto

El modelo de resistividad de este perfil muestra 2 unidades: una de baja resistividad, homogénea, horizontal, de 35-45 m de espesor, y otra de resistividad media, esta última a partir de una profundidad de 35-40 m (**Figura 38**); presentan valores de <17 ohm-m y >21 ohm-m, respectivamente. Estos valores, al igual que en el Perfil 1, coinciden con los de arcillas y arenas arcillosas.

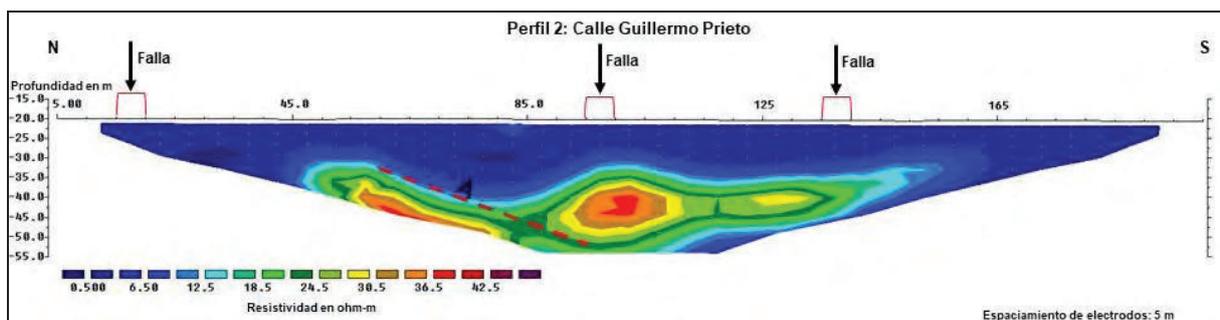


Figura 38. Modelo de resistividad del Perfil 2: Calle Guillermo Prieto. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. La línea roja segmentada (A), para este caso, pudiera ser un plano de falla sin reflejarse en la superficie.

Para este perfil, no se puede interpretar una coincidencia de esarpe con las fallas superficiales ya que fue levantado casi paralelamente a dichas fallas. Sin embargo, se logra observar un probable esarpe a una profundidad de aproximadamente 35 m, el cual no se refleja en la superficie (**Figura 38**, línea roja segmentada). En el lugar donde fue levantado este perfil, en

superficie se observaron 3 fallas afectando a la infraestructura del área (viviendas y vías de comunicación, **Figura 39**). Estas fallas intersectan el perfil del modelo de resistividad a los 15-20 m, 95-100 m y 135-140 m de longitud (**Figura 38**).



Figura 39. Falla en superficie afectando a la infraestructura del área. Obsérvese el fracturamiento sobre la calle (líneas rojas).

Perfil 3: Avenida Vicente Guerrero

Para el modelo de resistividad de este perfil se seleccionó el arreglo geofísico Wenner, ya que es el que mejor resolución presenta para esta sección.

En el modelo se distingue una cobertura de baja resistividad con algunas heterogeneidades y espesor variable entre 25-30 m a los extremos y 55 m en la parte central (**Figura 40**); así mismo, se observan 2 unidades de mayor valor: la del oeste de resistividad media y la del este de resistividad alta (**Figura 40**). Estos valores son: <3.5 ohm-m para la primera unidad, >3.5 a <6.5 para la segunda y >6.5 para la tercera. Al igual que en los anteriores perfiles, estos valores concuerdan con arcillas y posibles arenas arcillosas.

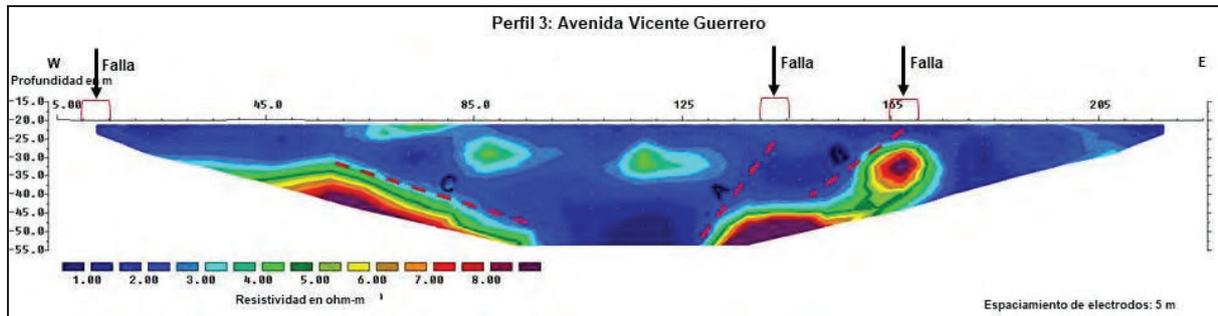


Figura 40. Modelo de resistividad del Perfil 3: Avenida Vicente Guerrero. La intersección entre las fallas observadas en superficie y el perfil se indica con flechas verticales. Las líneas rojas segmentadas (A, B) muestra los planos de falla interpretados en este trabajo. La línea roja segmentada (C), para este caso, pudiera ser un plano de falla sin reflejarse en la superficie.

En la zona donde fue levantado este perfil, en superficie se observaron 3 fallas afectando a la infraestructura del lugar (**Figura 41**). Dichas fallas intersectan el perfil del modelo de resistividad a los 10-15 m, 140-145 m y 165-170 m de longitud, concordando con los escarpes de las fallas “A” y “B” (**Figura 40**, líneas rojas segmentadas).



Figura 41. Falla en superficie afectando a la infraestructura del área (Falla A). Nótese el fracturamiento sobre la banqueta y la barda de la escuela (líneas rojas).

3.4. Análisis Estructural de Edificios

Se realizaron un total de 5 salidas al área de estudio para el levantamiento de datos estructurales, donde se obtuvieron un total de 39 puntos de información para conocer con detalle la distribución y características del fracturamiento.

Estos levantamientos consistieron en documentar la información básica de las fracturas, es decir, determinar sus características principales como son la orientación, la inclinación (donde la hubo), desplazamiento vertical (donde lo hubo), daños en infraestructura y tipo de material geológico presente.

Para el desarrollo de estos levantamientos se empleó un GPS y una brújula tipo Brunton, y la información obtenida se vertió en un sistema de información geográfica (SIG).

En la salida preliminar de reconocimiento se observó que la mayor afectación de la infraestructura, tanto en edificios como en vías de comunicación, se encontraba en la parte norte de Empalme, por lo que en cada una de las posteriores salidas se recorrió dicha zona, haciendo caminamientos siguiendo la dirección de cada uno de los lineamientos encontrados, describiendo lo observado en cada punto.

En toda la zona se notó que existen cuarteaduras en paredes, columnas, pisos, techos, bardas, cimientos y dalas (vigas de amarre) de las casas, así como en postes de luz de cemento, banquetas, jardineras y postes de teléfono (**Figuras 42-45**).

Así mismo, en estos recorridos se encontró, al menos, una casa abandonada debido al fracturamiento que están sufriendo las mismas (**Figuras 46-48**).

También se visitó al Panteón Municipal, ya que se tenía reportado fracturamiento en tumbas, corroborándose que efectivamente existe dicho fracturamiento en las mismas (**Figuras 49 y 50**). Dentro del panteón se observaron 4 tumbas con hundimiento, presentando una inclinación hacia el NE y un rumbo preferencial NW-SE (**Figuras 51 y-52**).



Figura 42. Punto MC001, de coordenadas UTM 3094469N, 518319E, ubicado sobre la Avenida Vicente Guerrero esquina con Callejón Ignacio Allende, de la Colonia Juárez, donde se puede observar fracturamiento en la pared de la casa (líneas rojas).



Figura 43. Punto MC001, de coordenadas UTM 3094469N, 518319E, ubicado sobre la Avenida Vicente Guerrero esquina con Callejón Ignacio Allende, de la Colonia Juárez, donde se observa daño tanto a la cimentación de la casa como de la barda y en la columna de esta última (líneas rojas).



Figura 44. Punto MC003, de coordenadas UTM 3094000N, 518483E, ubicado sobre la Calle Guillermo Prieto, entre Avenida Emiliano Zapata y Avenida Francisco I. Madero, de la Colonia Juárez, donde se observaron cuarteaduras en la pared de la vivienda (líneas rojas). También se puede observar que ya le realizaron reparaciones a la misma en la parte más afectada (polígono verde).



Figura 45. Punto MC033, de coordenadas UTM 3093449N, 518914E, ubicado sobre la Calle 4, entre la Avenida Quinta y Avenida de las Américas, Colonia Centro, donde se pueden ver fracturamientos en las paredes frontales de la vivienda (líneas rojas), así como reparaciones que ya le han hecho a las mismas y vueltas a cuartearse (áreas grises).



Figura 46. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se encuentra casa abandonada debido a que está muy afectada por el fracturamiento (líneas rojas) que existe en la zona (parte externa de la casa).



Figura 47. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se observan fracturamientos en las paredes y dalas (líneas rojas) en la parte interna de la casa abandonada. a) Cocina; b) sala.



Figura 48. Punto MC002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, ubicado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se puede ver fracturamiento (líneas rojas) en las paredes de la casa abandonada (recámara).



Figura 49. Punto MC009, de coordenadas UTM 3094522N, 519037E, localizado en el Panteón Municipal, donde se observa afectación en tumbas debido al fracturamiento de la zona, con un rumbo de 32° NE (líneas rojas).



Figura 50. Punto MC010, de coordenadas UTM 3094419N, 519044E, posicionado en el Panteón Municipal, donde se pueden ver cuarteaduras en la tumba y el rompimiento que ya tiene el brazo de la cruz de cemento (líneas rojas).



Figura 51. a) Punto MC005, de coordenadas UTM 3094507N, 519126E, localizado en el Panteón Municipal, donde se observa tumba inclinada (hundimiento), con rumbo N 84° W, echado de 4° al NE y un desnivel de 60 cm. b) Punto MC006, de coordenadas UTM 3094512N, 519115E, ubicado en el Panteón Municipal, donde se observa la segunda tumba inclinada (hundimiento), con rumbo N 83° W, echado de 6° al NE y desnivel de 40 cm.



Figura 52. a) Punto MC007, de coordenadas UTM 3094516N, 519107E, localizado en el Panteón Municipal, donde se ve la tercera tumba con inclinación (hundimiento), de rumbo N 83° W, echado de 5° al NE y desnivel de 17 cm. b) Punto MC008, de coordenadas UTM 3094519N, 519078E, posicionado en el Panteón Municipal, donde se encuentra la cuarta tumba con inclinación (hundimiento) de rumbo E-W, echado hacia el norte y desnivel de 55 cm.

Se tuvo la oportunidad de poder entrar a un par de casas habitadas para ver los daños en el interior de las mismas y en donde los dueños nos informaban que cada año hacían reparaciones, principalmente en el techo, ya que con las lluvias se goteaba (**Figuras 53-57**).



Figura 53. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, Colonia Juárez, observándose fracturamiento (líneas rojas) en el trabe que separa la cocina de la sala.



Figura 54. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, de la Colonia Juárez, notándose cuarteaduras (línea roja) e infiltración (polígono azul) en el techo de la vivienda.



Figura 55. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, ubicado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento (línea roja) en la pared que separa la sala de la calle.



Figura 56. Punto MC023A, de coordenadas UTM 3094494N, 518255E, localizado sobre la Calle Miguel Hidalgo I. Costilla final, de la Colonia Juárez, donde se observa desnivel en la puerta principal (líneas azules), la cual fue clausurada por las constantes reparaciones y el costo que conlleva.



Figura 57. Punto MC030, de coordenadas UTM 3094464N, 518457E, localizado en la Calle Guillermo Prieto esquina con Avenida Vicente Guerrero, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento (líneas rojas) en una de las columnas de la vivienda.

En la esquina este de la Escuela Secundaria General No. 2 Amado Nervo también se observó un fallamiento tanto en la barda como en los salones cerca de ésta, así como en la banqueta, guarnición y calle (**Figuras 58 y 59**).



Figura 58. Punto MC028, de coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento en la banqueta y barda de la escuela secundaria. a) Separación de la barda de 1 cm en la parte inferior hasta 6 cm en la parte superior; b) fracturamiento en la banqueta (líneas rojas).



Figura 59. Punto MC028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento en la vía de comunicación, guarnición y barda de la escuela (líneas rojas).

Todos estos datos levantados se geoposicionaron (**Figura 61**), al igual que todos los lineamientos encontrados en dicha zona (**Figura 62**), los cuales fueron un total de 23 fallas detectadas para la parte norte de Empalme.

Estas fallas presentan una dirección preferencial NW-SE (**Figuras 60 y 62**), el cual es paralelo a las fallas principales del Golfo de California, con un porcentaje del 70%; seguido de la dirección N-S (**Figuras 60 y 62**), con un porcentaje del 17%; posteriormente las de orientación E-W, con un porcentaje del 9%; y, por último, el rumbo NE-SW (**Figuras 60 y 62**), con un porcentaje del 4% .

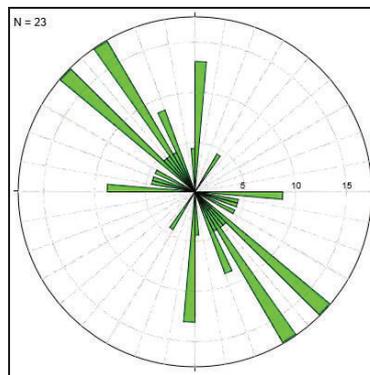


Figura 60. Gráfica mostrando los rumbos preferenciales de las fallas encontradas en la parte norte de Empalme, Sonora.

3.5. Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia

La subsidencia es un tipo de colapso del terreno que se presenta en diversos lugares del mundo, caracterizado por una deformación casi vertical o el asentamiento de los materiales de la tierra de manera paulatina, manifestándose en zonas urbanas y rurales mediante daños y agrietamientos en inmuebles e infraestructura en general, así como hundimientos diferenciales y agrietamientos de la superficie del suelo (Herrera *et al.*, 2013). Este tipo de colapso del terreno puede ocurrir en pendientes o en terreno llano; con frecuencia produce hoyos circulares en la superficie, pero puede generar un patrón lineal o irregular (Keller y Blodgett, 2007).

Por lo tanto, el concepto de hundimiento es relacionado con subsidencia: el asentamiento de una masa material terrestre por debajo del nivel del material circundante.

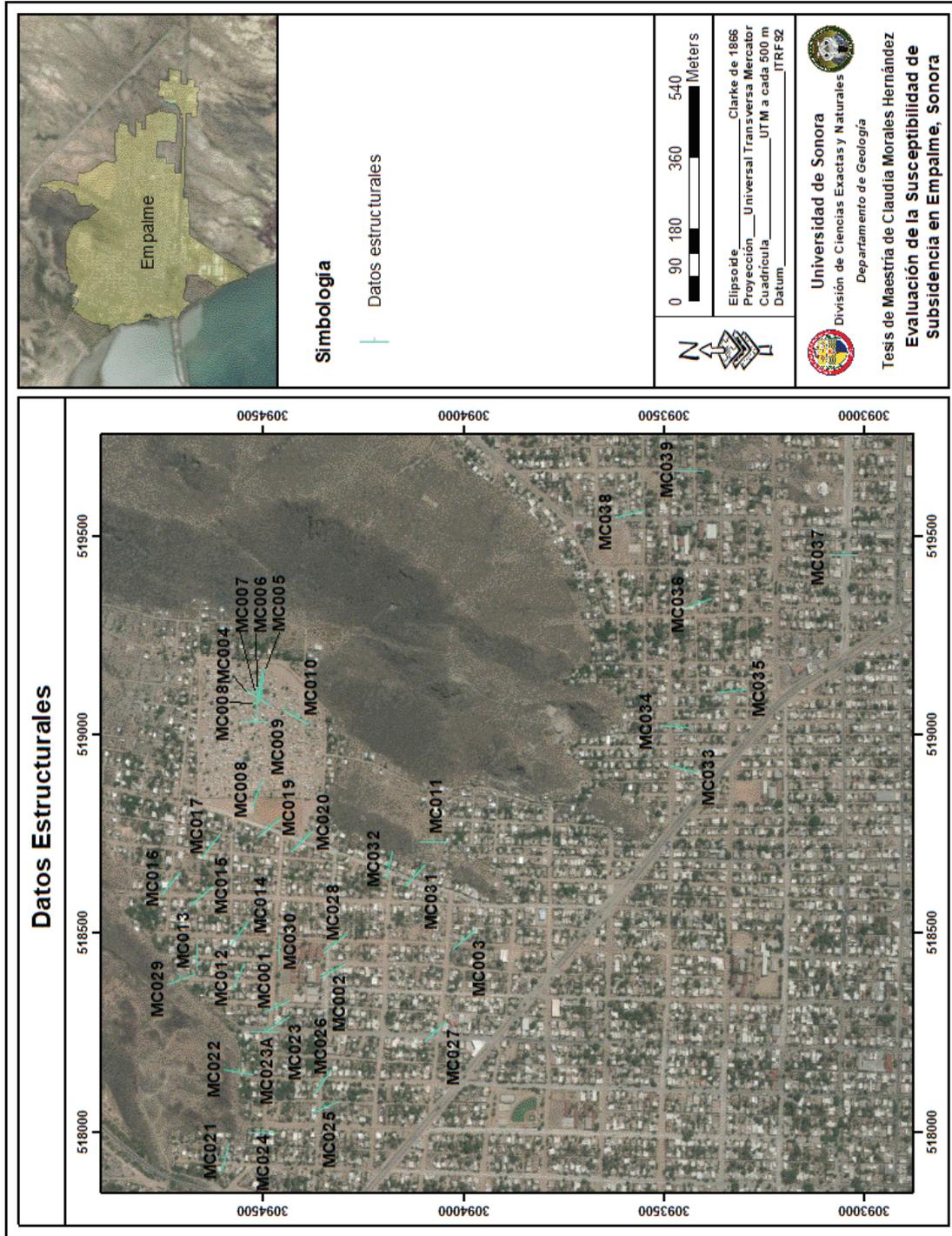


Figura 61. Geoposicionamiento de los puntos levantados en campo (datos estructurales) en la zona de estudio.

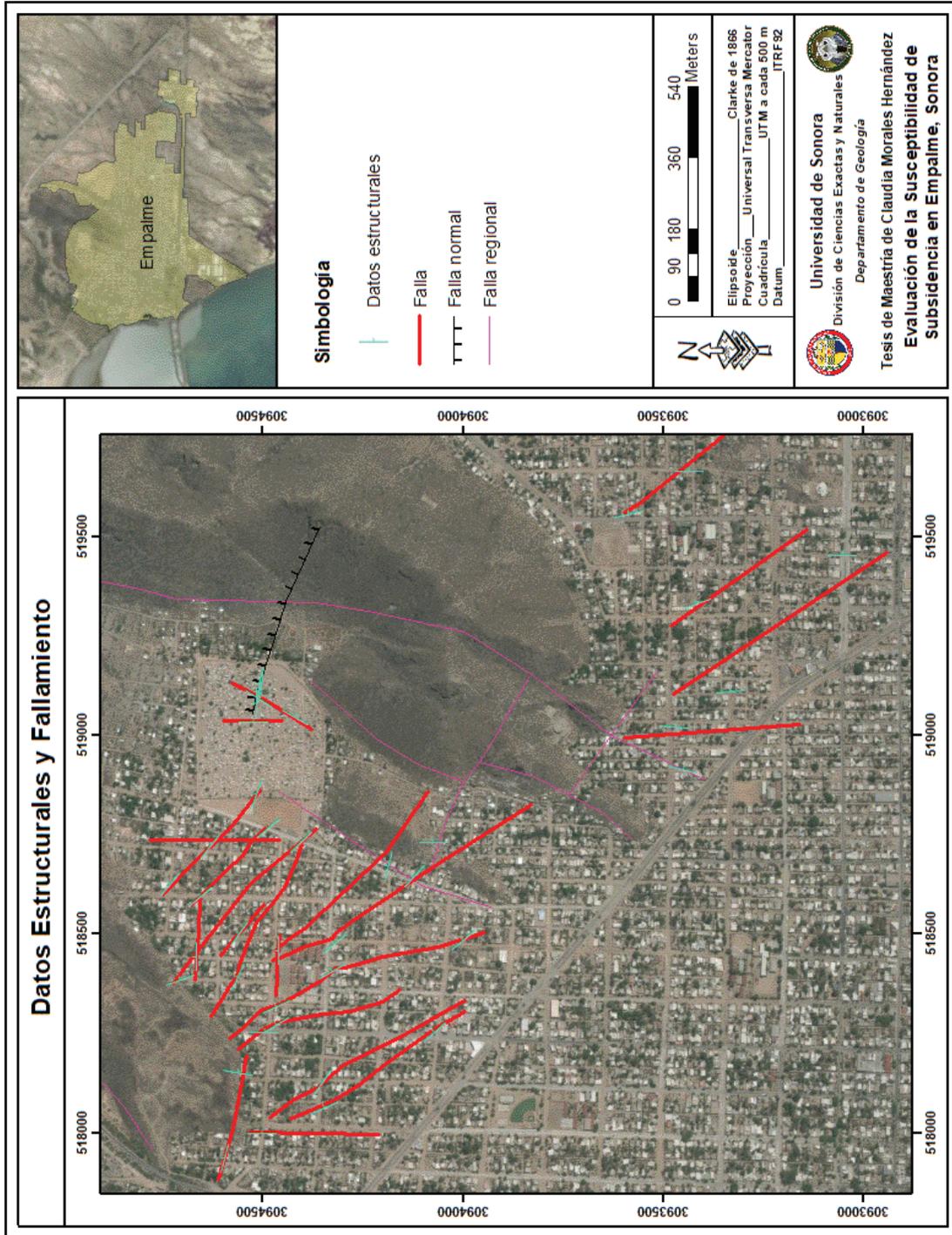


Figura 62. Geoposicionamiento de los puntos levantados en campo (datos estructurales), así como de la dirección de las fallas encontradas en la zona de estudio.

La subsidencia puede ser causada por la disolución y el derrumbe de roca (colapsos de cavidades subterráneas), eliminación de fluidos del subsuelo y compactación de sedimento, eliminación de roca o fracturación, sismos, entre otros, y sus consecuencias abarcan impactos sociales, tales como el abandono de viviendas y deterioro de las mismas, impactos económicos representados en la inversión para restauración de edificaciones y líneas vitales e impactos ambientales que incluyen cambios en el paisaje, agotamiento de las fuentes de agua y contaminación de acuíferos.

Debido a que la magnitud de los hundimientos puede ser de sólo unos cuantos centímetros por año, éstos son casi imperceptibles; sin embargo, al cabo de algunos pocos años, los asentamientos tienden a generar problemas, que pueden ser cambios en el drenaje natural del área que se hunde.

El fenómeno de fracturamiento superficial asociado a subsidencia es dinámico, pues con el tiempo aparecen nuevas fracturas o se reactivan las ya existentes, provocando cambios en las condiciones iniciales de estabilidad mecánica del material. De ahí que se pueden diferenciar factores generadores y disparadores del fracturamiento (extracción de agua, cargas estáticas y dinámicas, sismos, entre otros) que se interrelacionan de manera variable y provocan que la propagación de fracturas en el subsuelo sea una problemática compleja. Es decir, asociados a los hundimientos se pueden presentar fallamientos tanto del suelo como del subsuelo en la forma de grietas o desplazamientos verticales del terreno, los cuales afectan, frecuentemente, todo tipo de infraestructura civil debido a que este fenómeno es más notorio en las áreas urbanas.

En la Ciudad de Empalme, Sonora, el fenómeno de subsidencia no ha sido estudiado de manera formal o científicamente; solamente en diversos diarios locales se tienen reportes de manifestaciones del fenómeno, tanto en esta ciudad como en otras partes del Estado, por lo que no se ha realizado un estudio que aporte información técnica que permita una adecuada gestión del riesgo.

El fenómeno caracterizado por una amenaza es expresado por un factor de riesgo, es decir, la vulnerabilidad que se define como la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada en caso de sufrir un fenómeno desestabilizador de origen natural o antrópico (Leal, 2017).

Particularmente, en caso de zonas sísmicas en relación con la planificación territorial, la vulnerabilidad se considera constante, ya que el elemento está expuesto o ubicado en el área de influencia del fenómeno peligroso.

Maldonado y Chio (2009) comentan que la vulnerabilidad sísmica es una medida que permite clasificar a las estructuras de acuerdo con sus características y calidad estructural, dentro de un rango de vulnerabilidad baja, intermedia y alta, ante la acción de un sismo.

Para Cano *et al.* (s/f), el escenario de pérdidas debido a un terremoto que afecte una ciudad depende de muchas variables, algunas de las cuales están asociadas al fenómeno mismo (por ejemplo, características del sismo, duración, trayectoria, distancia hipocentral, etcétera), así como variables relacionadas con el entorno y ubicación de las edificaciones (*i.e.*, tipo y característica de los suelos, topografía, etcétera), y otras variables directamente dependientes de las características físicas y dinámicas de las edificaciones existentes (por ejemplo, materiales, configuración estructural, entre otras).

Y para Reyes *et al.* (s/f), la vulnerabilidad sísmica puede clasificarse según los elementos a evaluar y de acuerdo a la forma de estimación del grado de daño esperado en las estructuras, catalogando estos elementos en: estructurales, no estructurales, funcionales, sociales y sistemáticos, y estimando el daño en: observado, calculado e híbrido.

Para la Organización Panamericana de la Salud (OPS; 1999), el término estructural, o componentes estructurales, se refiere aquellas partes de un edificio que lo mantienen en pie; esto incluye cimientos, columnas, muros, vigas y diafragmas (entendidos éstos como los pisos y techos diseñados para transmitir fuerzas horizontales, como las de sismos, a través de las vigas y columnas hacia los cimientos). Por lo tanto, la vulnerabilidad estructural se refiere a la susceptibilidad que la estructura presenta frente a posibles daños en las partes del edificio que lo mantienen de pie ante un sismo de mediana a gran intensidad.

Para diagnosticar el nivel de vulnerabilidad de un edificio es necesario realizar un análisis de los daños a través de metodologías y técnicas de evaluación.

Una clasificación general y simplificada de las metodologías de evaluación se basa en el tipo de medida que se utilizan y se agrupan como: **cuantitativas** (*i.e.*, Preciado *et al.*, 2015; Cárdenas,

2008; Benedetti y Petrini, 1984) que establecen las probabilidades de daño o relaciones determinísticas equivalentes en términos numéricos y el comportamiento dinámico de las estructuras; y **técnicas cualitativas** (i.e., Iglesias *et al.*, 1988; Rodríguez y Castellón, 1995; Suárez *et al.*, 2009; Grünthal, 1998) que optan por descripciones adjetivas a través de términos como vulnerabilidad baja, media, alta, o similares (Safina, 2003).

Muchos mapas de amenaza se han convertido en mapas de riesgo, donde la vulnerabilidad es invariante por estar los elementos físicamente expuestos (Cardona, 2003). Ciertamente la vulnerabilidad es constante al estar permanentemente expuestos todos los elementos ante un fenómeno natural, considerando la susceptibilidad física (infraestructura) y vulnerabilidad social (respuesta social, conocimiento de la amenaza) que son datos indispensables para la determinación del riesgo.

Para este tema de la Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia, el alcance de este trabajo adopta un grado de profundidad aplicativo a nivel diagnóstico, es decir, el resultado presenta el estado y grado de daño actual que tienen las edificaciones observadas. En base a estos resultados se podrán emitir ciertas recomendaciones finales.

Se contempla también que el estudio sea micro en la medida que se enfoca específicamente en polígonos con algunas manzanas de la parte norte de la Cabecera Municipal de Empalme como área de estudio, ya que son los lugares que se identificaron más afectados y se ubican en zona de subsistencia de riesgo alto a severo.

Se realizó observación directa para registrar los daños en la infraestructura del lugar ocasionados por los hundimientos. Estas observaciones ayudaron no solo a obtener dichos datos, sino que a identificar el rumbo que tienen las fallas de la zona y el tipo de grietas que se presentan: diagonal y horizontal, principalmente; diagonal escalonado, en algunos casos; y, en menor grado, vertical.

Ya analizada la información de campo, se toma en cuenta el criterio de evaluación propuesto por Julio *et al.* (2012), el cual es de gran utilidad para poder asignar una clasificación de daño a las viviendas afectadas por el fenómeno de subsistencia, en este caso, para la parte norte de Empalme, Sonora, ya que, hasta el momento, es el que mejor describe el agrietamiento debido a este fenómeno.

Para este propósito se estimará la clase de daño para la infraestructura del lugar, en donde se identificaron daños estructurales (**Tabla 7**):

Tabla 7. Valores de daños asociados a subsidencia (Julio et al., 2012).

Valores de daño	Daños
0.02 Bajo	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas ligeras en paredes - Desprendimiento de pequeños fragmentos de recubrimiento
0.10 Moderado	<ul style="list-style-type: none"> - Estrechos y amplios agrietamientos en paredes - Desprendimiento de medianos fragmentos de recubrimiento
0.40 Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Grietas en paredes con separación <1 cm - Deformación de puertas o marcos de ventanas de herrería que previenen movimiento óptimo - Hundimiento o deformación ligera en pisos
0.75 Severo	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes grietas en paredes con separación > 1 cm - Deformación de puertas o marcos de ventanas de herrería que previenen su movimiento - Hundimiento y deformación en el suelo - Separación de edificaciones colindantes - Deformación o grietas sobre el piso - Hundimiento parcial del edificio
1.00 Demolición	<ul style="list-style-type: none"> - Parcial o total

A partir de estos datos, se analizaron los daños a manera general en toda la zona afectada para su clasificación, observándose que existen 3 tipos de daños:

- **Severo (Figura 63):** Panteón Municipal; parte de la Colonia Juárez, en las avenidas Vicente Guerrero y Francisco Villa y las calles Guadalupe Victoria, Ignacio Ramírez, Guillermo Prieto, Valentín Gómez Farías y Melchor Ocampo; y parte de la Colonia Moderna Norte, en la Avenida Vicente Guerrero y las calles de Benito Juárez final, José María Morelos final, Mariano Matamoros final y Niños Héroes final.
- **Alto (Figura 63):** Parte de la Colonia Moderna Norte, en las avenidas Francisco Villa, Venustiano Carranza y Emiliano Zapata, y en las calles de José María Morelos, Mariano Matamoros, Niños Héroes, Mariano Abasolo, Miguel Hidalgo y Costilla, Callejón Ignacio Allende, Guadalupe Victoria, Ignacio Ramírez, Guillermo Prieto, Melchor Ocampo y José Urrea; y parte de la Colonia Centro, sobre las avenidas Quinta, Tercera, 6, 3, 2, 5 de Mayo, 7 y 5, así como las calles 4, 5, 6, 8, 1, 2, 3 y 4, entre otras calles sin nombre.

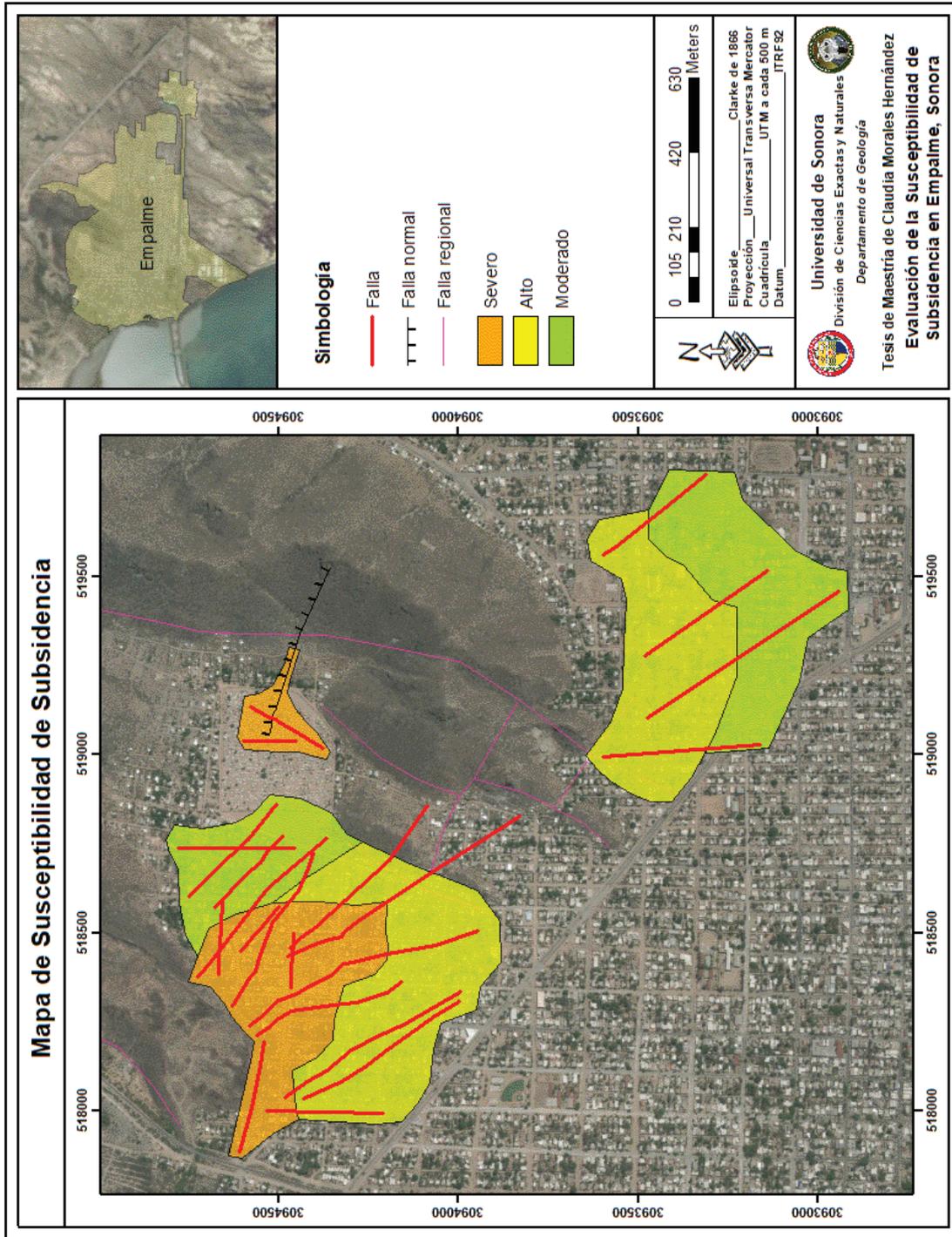


Figura 63. Mapa de subsistencia de subsistencia mostrando las zonas con daño severo (anaranjado), alto (amarillo) y moderado (verde) en la parte norte de Empalme, Sonora (polígonos naranjas).

- **Moderado (Figura 63)**: Parte de la Colonia Juárez: Avenida Roque Murillo y las calles de Valentín Gómez Farías, Melchor Ocampo, Juan Álvarez y José Urrea; así como parte de la Colonia Centro: avenidas 0 y Constitución y las calles 1, 10ma, 11va, 14a, 13, 15 y 5.

Los daños principales que se han identificado en la parte norte de la Ciudad de Empalme son en las cimentaciones y en la estructura resistente vertical o muros de carga (como columnas, dalas), así como en paredes, techos, bardas y pisos. Se pueden observar las siguientes figuras como ejemplo de estos daños (**Figuras 64-73**). También se observó daños en los postes de alumbrado público y de líneas telefónicas en las colonias antes mencionadas.

Daño Severo (0.75):



Figura 64. Punto MC-028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, localizado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, en donde se puede observar la separación del muro desde 1 cm en la parte inferior hasta 6 cm en la parte superior.



Figura 65. Punto MC-028, coordenadas UTM 3094335N y 518478E, ubicado en la Avenida Francisco Villa esquina con Calle Guillermo Prieto, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento desde la vialidad, guarnición, banquetta, hasta la barda de la escuela.



Figura 66. Punto MC-002, de coordenadas UTM 3094330N, 518405E, localizado sobre la Avenida Francisco Villa, entre las calles Guadalupe Victoria e Ignacio Ramírez, de la Colonia Juárez, donde se encuentra casa abandonada debido a que está muy afectada por el fracturamiento que existe en la zona.



Figura 67. Casa localizada en la Calle Ignacio Ramírez, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, Colonia Juárez, donde se puede ver: (a) agrietamiento casi vertical (línea roja) en la parte superior de la barda o muro de separación, con separación de 1 cm o mayor y desprendimientos de fragmentos (polígonos verdes), así como alejamiento de la barda de colindancia con el poste desde 4-5 cm en la base hasta 15 cm en la parte superior.



Figura 68. a) Punto MC-021, coordenadas UTM 3094599N y 517931E, ubicado sobre la Calle Benito Juárez García, entre Avenida Vicente Guerrero y Camino a San José de Guaymas, Colonia Moderna Norte, donde se presenta un agrietamiento vertical (línea roja), dañando tanto a pared como al techo y, probablemente, a cimientos. Nótese desprendimiento de fragmentos en la parte inferior de la pared, sobre la zona gris. b) Punto MC-013, coordenadas UTM 3094671N y 518441E, ubicado sobre la Calle Ignacio Ramírez final, en la Colonia Juárez, donde se observa agrietamiento tanto diagonal como horizontal, vertical y diagonal escalonado (líneas rojas), así como desprendimiento de fragmentos (polígono verde) en la esquina inferior derecha de la casa.



Figura 69. a) Punto MC-023, coordenadas UTM 3094466N y 518269E, ubicado en la Calle Miguel Hidalgo y Costilla esquina con Avenida Vicente Guerrero, entre Avenida Francisco Villa y Calle Mariano Abasolo y Callejón Ignacio Allende, Colonia Juárez, donde se observa fracturamiento vertical (líneas rojas) en una de las columnas de la barda. b) Casa localizada en Ignacio Ramírez esquina con calle sin nombre, Colonia Juárez, donde se observa agrietamiento horizontal y vertical, en este último, con algunas aberturas de más o menos 1 cm o más y desprendimiento de fragmentos.



Figura 70. Punto MC-012, coordenadas UTM 3094566N y 518389E, localizado en la Calle Guadalupe Victoria, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, Colonia Juárez, observándose fracturamiento horizontal y diagonal (líneas rojas) y con desprendimientos de pequeños fragmentos.

Daño Alto (0.40):



Figura 71. Casa localizada sobre la Calle Guadalupe Victoria, entre Avenida Vicente Guerrero y calle sin nombre, de la Colonia Juárez, donde se puede ver fracturamiento diagonal (línea roja) en la esquina inferior derecha de la casa.



Figura 72. Punto MC-033, de coordenadas UTM 3093449N, 518914E, ubicado sobre la Calle 4, entre la Avenida Quinta y Avenida de las Américas, Colonia Centro, donde se pueden ver fracturamientos en las paredes frontales de la vivienda, de tipo diagonal escalonado, horizontal, vertical y diagonal, así como reparaciones que ya le han hecho a las mismas y vueltas a cuartearse (áreas grises).



Figura 73. Punto MC-034, de coordenadas UTM 3093473N y 519019E, ubicado en la Avenida Quinta esquina con calle sin nombre, de la Colonia Centro, donde podemos observar fracturamiento principalmente diagonal con algunos desprendimientos pequeños de fragmentos cerca de la ventana derecha.

3.6. Determinación Zona de Riesgo

El concepto de riesgo puede ser muy diverso y tener distintas clasificaciones, pero la definición principal sería: *posibilidad de que se produzca un contratiempo o una desgracia, de que alguien o algo sufra perjuicio o daño*; es decir, es la estimación probable de pérdidas y daños esperados (personas, bienes materiales, recursos económicos) ante la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o tecnológico (Juárez y Loayza, 2015).

Font *et al.* (1995-1996) hablan sobre los riesgos geológicos en la ordenación territorial al afirmar: “...*el aumento de catástrofes naturales obedece al efecto del crecimiento demográfico en los últimos tiempos, lo cual se han ocupado zonas sometidas a riesgos geológicos...*” Esto es un punto clave para la problemática del riesgo geológico que enfrenta cualquier población al estar en crecimiento, al ocupar zonas con alto grado de vulnerabilidad sin saber que en cualquier momento se pudiera presentar un evento catastrófico.

Es importante mencionar que los riesgos naturales es todo aquel proceso en el que interviene algún aspecto geológico (Llorente y Laín, 2009); es decir, un proceso natural se convierte en un peligro cuando amenaza la vida humana, ecosistemas, infraestructura urbana, medios de comunicación, etcétera.

En el presente estudio se evaluó el riesgo cualitativamente a partir de la vulnerabilidad y del peligro.

Dentro de vulnerabilidad, se puede considerar todo aquello que es susceptible a sufrir algún daño, como:

- Infraestructura urbana (casas-habitación, escuela, panteón, tuberías, electricidad, etcétera)
- Cambios en el gradiente que afecta al flujo del drenaje natural
- Ecosistemas
- Vías de comunicación (carretera, aeropuerto, puentes, vías del ferrocarril, etcétera)

En cuanto a los peligros se consideraron los siguientes fenómenos geológicos, que tienen una concatenación (**Figura 74**):



Figura 74. Diagrama de flujo de los fenómenos geológicos que tienen una concatenación, donde los sismos generan fallas y éstas, a su vez, originan subsidencia.

- **Sismos:** donde la amenaza sísmica o peligrosidad sísmica se entendería como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno sísmico con intensidades o magnitudes esperadas en una región o área determinada y durante un periodo de tiempo específico (Barbat *et al.*, 2005), generando movimiento y ruptura del suelo.
- **Reactivación de Fallas:** la cual está siendo generada por los sismos y donde la etapa de desarrollo de la interacción de fallamiento y fracturamiento de los suelos se caracteriza por la formación de un agrietamiento de tensión que se lleva a cabo a lo largo de planos preexistentes, los cuales, se considera, son las fallas geológicas sepultadas por los suelos actuales, pero a veces con presencia morfológica (Ávila y Garduño, 2003).

- **Subsistencia:** que sería el producto de sismos y fallas. Este fenómeno genera hundimiento de mayor a menor grado dependiendo de la zona en que se encuentre; siendo este un hundimiento diferencial, que es el responsable de los daños que se presentan en toda edificación que se encuentre sobre el eje de su traza (Ávila *et al.*, 2007).

Para evaluar en el área de estudio el grado de riesgo en el cual se encuentra, fue considerada la vulnerabilidad como el daño estructural a la vivienda, a partir de los índices de daño propuestos por Park *et al.* (1993), mientras que el peligro es evaluado a partir de la velocidad de propagación de la onda sísmica (PGA). Los índices de daño se dan a partir de los daños observados después de la ocurrencia de un sismo (**Tabla 8**). Éste se expresa en una escala normalizada ($0 < ID < 1$) y se adoptó la clasificación de estado de daño propuesta por Park *et al.* (1993), ligeramente modificada, con la intención de que este índice de daño cuantitativo calzara con el rango cualitativo de la metodología HAZUS para la estimación de pérdidas.

Tabla 8. Caracterización del daño para el Estado de Daño e Índice de Daño de Park *et al.* (1993) (modificada de: Park *et al.*, 1993, *in* Reyes *et al.*, *s/f*, y EERI, 1996, *in* Cano *et al.*, *s/f*).

Estado de daño	Índice de daño	Descripción del estado de daño
Menor	$ID < 0.2$	Daño no estructural leve o aislado (agrietamiento ligero). La estructura continúa funcionando con normalidad en menos de una semana.
Moderado	$0.3 \leq ID < 0.5$	Daño no estructural moderado o considerable y daño estructural leve. Agrietamiento fuerte y pérdida del recubrimiento localizado en varios elementos estructurales. La estructura puede estar cerrada hasta por 3 meses. El riesgo que se produzcan pérdidas de vidas humanas es mínimo.
Severo	$0.6 \leq ID < 0.8$	Daño no estructural severo y daño estructural moderado. Aplastamiento del concreto y exposición del refuerzo. Es posible que la estructura deba estar cerrada por un periodo largo de tiempo y en el peor de los casos, puede ser necesario demoler la estructura. Hay un alto riesgo que se produzcan pérdidas de vidas humanas.
Total	$0.8 \leq ID < 1.0$	Daño estructural muy fuerte o cerca del colapso (colapso parcial). Más económico demoler que reparar, pues los daños son irreparables y hay una probabilidad muy alta de que se produzcan pérdidas de vidas humanas.
Colapso	$ID \geq 1.0$	Colapso total de la estructura.

Para estimar el daño estructural se hizo uso de funciones de las aceleraciones horizontales del suelo (PGA) debido a un sismo propuesto a diferentes distancias contra el índice de daño (ID), generando curvas de daño de forma trilineal donde se observa la aceleración a la cual el daño comienza (ID > 0) y la aceleración a la que el edificio sufre daño severo (ID = 0.8) (**Tabla 9, Figura 75**).

Tabla 9. Índice de daño contra las variaciones de aceleración (PGA) a diferentes distancias epicentrales y distintos sismos.

ID	Aceleración (PGA)				Sismo
	25 km	50 km	75 km	100 km	
0	0.013973	0.006237	0.003615	0.002347	2.6
0.1	0.017574	0.007845	0.004547	0.002952	3.0
0.2	0.023409	0.010450	0.006057	0.003933	3.5
0.3	0.031180	0.013919	0.008068	0.005238	4.0
0.4	0.041532	0.018540	0.010746	0.006977	4.5
0.5	0.046578	0.020792	0.012051	0.007825	4.7
0.6	0.055320	0.024694	0.014313	0.009293	5.0
0.7	0.073685	0.032893	0.019065	0.012379	5.5
0.8	0.082638	0.036889	0.021382	0.013882	5.7

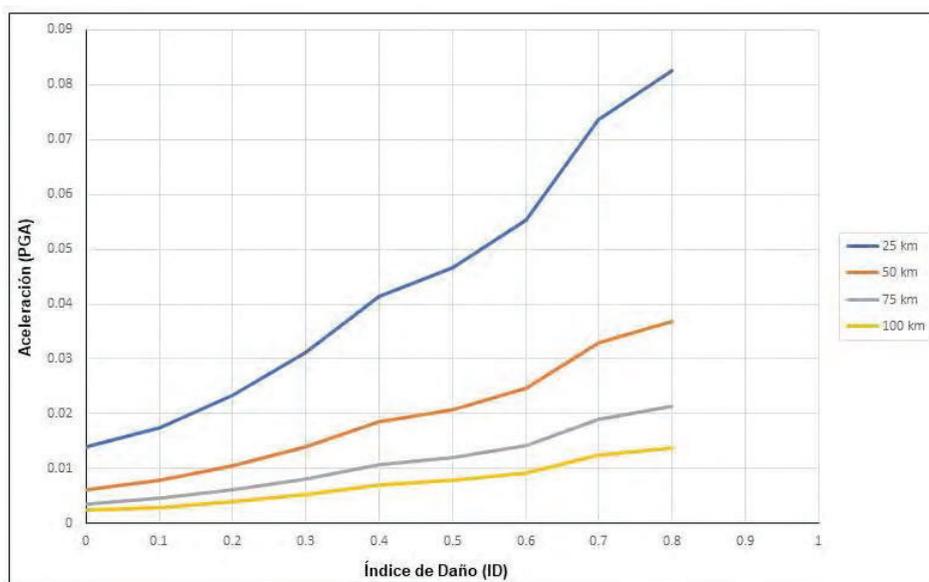


Figura 75. Funciones de las aceleraciones horizontales del suelo (PGA) contra el índice de daño (ID), donde se pueden observar las curvas de daño de forma trilineal y el aumento de daño de 0 a 0.8.

En base a la correlación de ID y PGA se pudo determinar el mapa de riesgo, como se muestra en la **Figura 76**, donde se puede observar que el 23% de la zona norte corresponde a un riesgo severo (Colonia Juárez, 20%, y Panteón Municipal, 3%), mientras que el 45% del área norte corresponde a un riesgo moderado (Colonia Moderna Norte, 25%, y Colonia Centro, 20%), y el 32% a un riesgo menor (Colonia Juárez, 12%, y Colonia Centro, 20%).

Otro factor importante es la correlación de intensidades de Mercalli con los valores de aceleración pico del terreno (PGA) y de velocidad pico de tierra (PGV) (**Tabla 10**) que son utilizados en los mapas de sismos (tomada de Worden *et al.*, 2012):

Tabla 10. Tabla de correlaciones de intensidades de Mercalli con valores de aceleración pico del terreno (PGA) y la velocidad pico de tierra (PGV) (tomada de Worden *et al.*, 2012).

Escala de Mercalli	Aceleración sísmica (PGA)	Velocidad sísmica (cm/s)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I	< 0.0017	< 0.1	No apreciable	Ninguno
II-III	0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	8.1 - 16	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	16 - 31	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 - 1.24	60 - 116	Violento	Fuerte
X+	> 1.24	> 116	Extremo	Muy fuerte

Al correlacionar la gráfica de índice de daño (**Figura 75**) contra la aceleración para distintos sismos a diferentes distancias para la Ciudad de Empalme (**Tabla 9**) y las correlaciones de intensidades de Mercalli, PGA y PGV (**Tabla 10**), se obtuvo lo siguiente:

Para un epicentro a 25 km de distancia, se observa que para un sismo de magnitud 3 (menor) en la escala de Richter, se tiene un PGA de 0.018, por lo que la onda sísmica viajará a una velocidad entre 0.1-1.1 cm/s (PGV), sintiéndose el temblor con una intensidad de II-III (muy leve) en la escala de Mercalli, presentando un índice de daño menor (0.1), pero sin ningún potencial de daño para los edificios.

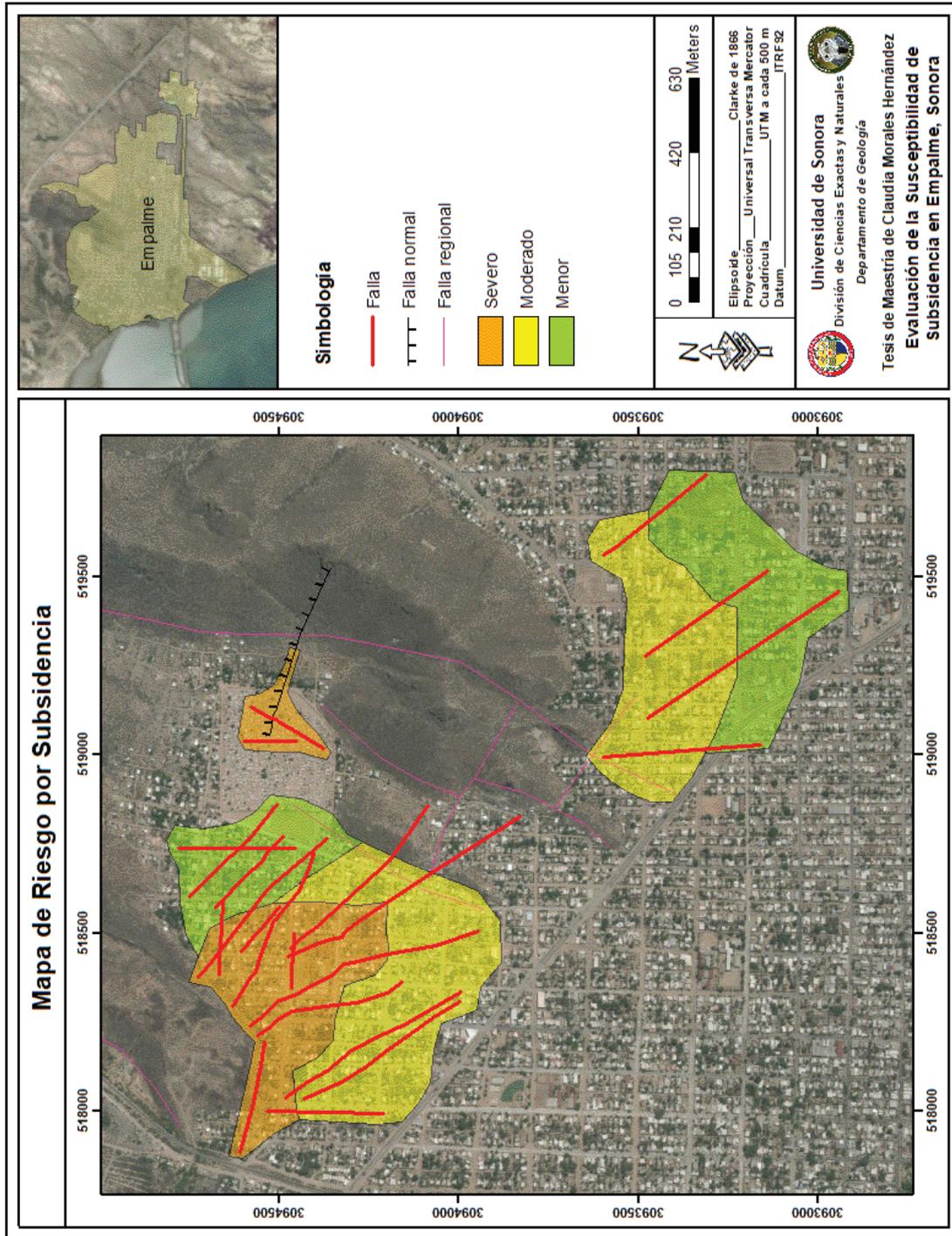


Figura 76. Mapa de Riesgo por Subsistencia producida por sismo en la parte norte de Empalme, Sonora.

Al aumentar la magnitud, se incrementan el PGA y el PGV, generando un índice de daño y potencial de daño mayores. Es decir, si a esta distancia de 25 km, se llegará a presentar un sismo de magnitud 4.5 (ligero) o uno de 5.7 (moderado) en la escala de Richter, se tendría un PGA de 0.042 y 0.083, respectivamente, un PGV entre 3.4-8.1 cm/s, sintiéndose el temblor con una intensidad de V (moderado) en la escala de Mercalli, produciendo un índice de daño de moderado (0.4) a severo (0.8), respectivamente, con un potencial de daño a las edificaciones muy leve.

Para un epicentro a 50 km de distancia, si se presenta un sismo de magnitud 3 (menor) en la escala de Richter, el PGA sería de 0.008, mostrando un índice de daño menor (0.1), con una velocidad de onda sísmica (PGV) entre 0.1-1.1 cm/s, concibiendo el temblor con una intensidad de II-III (muy leve) en la escala de Mercalli. Si a esta distancia se generara un sismo de magnitud 4.5 (ligero) o uno de 5.7 (moderado) en la escala de Richter, se tendría un PGA de 0.019 y 0.037, respectivamente, un PGV entre 1.1-3.4 cm/s, apreciándose el temblor con una intensidad de IV (leve) en la escala de Mercalli y generando un índice de daño de moderado (0.4) a severo (0.8), respectivamente, pero sin ningún daño potencial a las edificaciones.

Aunque los parámetros para estas dos distancias son muy parecidos, la diferencia está en que la onda sísmica (PGA) viajará más lentamente entre más alejado esté el epicentro, llegando a su destino con menor fuerza, por lo que el daño para la infraestructura será mínimo con respecto a un epicentro cercano.

Para los epicentros con distancias de 75 y 100 kms, donde empieza a verse un cambio en las curvas de daño es a partir del índice de daño 0.4 (moderado) y magnitud de 4.5 (ligero) en la escala de Richter, presentando un PGA de 0.011 y 0.007, respectivamente, y una velocidad sísmica (PGV) < 1.1 cm/s, por lo que el temblor será no apreciable o muy leve, ya que es de intensidad I-III (muy débil-leve) en la escala de Mercalli, llegando la onda sísmica muy débil al área de estudio, sin producir daño a la infraestructura del lugar, pero sí generando movimiento o vibración en fallas y fracturas.

4. DISCUSIÓN

Una parte importante del trabajo fue la recopilación de información, la cual fue estudiada y tomada de varios documentos de múltiples lugares del mundo, donde se llega a comprender que el fenómeno de subsidencia no está aislado o es exclusivo de ciertas zonas; en cambio, por la cantidad de eventos que lo originan, está disperso en varias regiones, ayudando a encontrar buena cantidad de información y exponer los puntos importantes sobre el mismo.

Con base en los datos recabados del Servicio Sismológico Nacional y del *U.S. Geological Survey*, para la región de Guaymas y Empalme se han presentado, al menos, 839 sismos con magnitudes entre 2.6° y 5.7° en la escala de Richter, en un radio de 0 km a 100 km a la redonda, tomando como centro la Ciudad de Empalme, desde 1901 hasta julio del 2018, ubicando a esta región en el área de actividad sísmica moderada, según la información de Pérez *et al.* (2015), y en la Zona Sismogénica I de Ramírez (2005). De acuerdo con el FONDEN (2011), a esta región se le otorga un grado de hasta 5.5 de magnitud en la escala de Richter, esperándose para esta zona sismos leves a mediana intensidad. Estos sismos pueden ser de someros a intermedios. Y en el Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Empalme, realizado en el año 2011, reportan esta zona como un área de intensa actividad sísmica, con rangos de intensidad que varían entre I y V grados en la escala de Mercalli.

En el Mapa de Sismos para el suroeste del Estado de Sonora como se mostró en la **Figura 12**, se observa que existen dos grupos o enjambres de focos sísmicos: uno hacia el SW de la Ciudad de Empalme, con una orientación NW-SE, concordando con las fallas transtensionales principales del Golfo de California, y el otro hacia el SE de Empalme, con una dirección NE-SW, coincidiendo con el Graben de Empalme (Valle de Empalme-Guaymas), los cuales no han sido reportados por ningún autor.

Con respecto a los datos de PGA, éstos se realizaron a partir de los sismos que se han presentado en la zona, los cuales van desde 2.6 (microsismo) hasta 5.7 (sismo moderado), a una distancia máxima de 100 km desde Empalme, donde se tiene que conforme aumenta la magnitud, se incrementa el PGA y dependiendo de la distancia, variará la intensidad con que llegará la onda sísmica al área de estudio. Se realizaron algunos ejemplos de estos PGA en los mapas de Propagación de Onda Sísmica mostrados en las **figuras 13-17**, en donde los rangos

de intensidad que afectan zonas habitadas varían desde I (muy débil) hasta VI (poco fuerte) en la escala de Mercalli (de <2, micro, a 5.5-5.9, moderado, en la escala de Richter). Mientras que Ramírez (2005) reporta diferentes PGA para esta zona, ya que utiliza sismos mayores o iguales a magnitud 6, por lo que sus rangos de intensidades para MMI y PGA corresponden a magnitudes ≥ 6 ; además utiliza menor cantidad de datos sísmicos.

En base al análisis de la Geología Estructural Local, se identificaron 3 grupos de estructuras, donde se tiene que el 21% corresponde a fallas de tipo normal con rumbos principales NNE (69%) y NNW (31%); el 23% a fallas de desplazamiento lateral con direcciones preferenciales NNE (61%) y NNW (31%), las cuales están asociadas a eventos distensivos o transtensionales, coincidiendo las segundas con la orientación del Sistema de Fallas del Golfo de California; y el 56% a lineamientos menores o secundarios (fracturas) con orientaciones principales NE (77%) y NW (23%), donde las primeras (NE) coinciden con la dirección que presentan tanto el Valle Empalme-Guaymas (Graben de Empalme) como el enjambre de focos sísmicos ubicado hacia el SE de Ciudad de Empalme, como se pueden ver en las **figuras 12 y 18**.

Para el caso de las fallas de tipo normal, Vega *et al.* (2004) y Roldán *et al.* (2004) reportan que éstas provocan el basculamiento de las secuencias volcánicas terciarias, produciendo cuencas de semigraben escalonadas; además, Vega *et al.* (2004) comentan que existen evidencias de que este fallamiento ha ocurrido en etapas y que la unidad volcánica más antigua, los aglomerados que la cubren y su basamento granítico-metamórfico han sufrido un basculamiento de hasta 78°. Mientras que para Stewart (1971), este fallamiento, desde el punto de vista tectónico, puede correlacionarse con la fase distensiva terciaria denominada *Basin and Range* (o Sierras y Valles Paralelos), la cual produce sierras alargadas en dirección aproximada N-S y valles intermontanos.

Con el estudio de Tomografía Eléctrica de Resistividad (Geofísica) se identificó que geológicamente el suelo del área de estudio está compuesto por capas de sedimentos arcillosos y areno-arcillosos, de un alto grado de compresibilidad, lo que hace al terreno susceptible a deformaciones debido al peso de las edificaciones. Asimismo, con este estudio se comprobó la presencia de estructuras sepultadas que coinciden con la presencia superficial de evidencias de subsistencia.

Con respecto a la información recaba en campo sobre los daños en la infraestructura urbana se observó que la mayor afectación en la Ciudad de Empalme es la parte norte de la misma, ya que se encontraron un total de 23 fallas que tienen un rumbo preferencial NW-SE (70%), el cual es paralelo a las fallas principales del Golfo de California; además de otras con direcciones N-S (17%), E-W (9%) y NE-SW (4%). La evolución y crecimiento de estas fallas no están documentados para dicha ciudad por lo que es difícil estimar o dar una fecha precisa del tiempo de aparición de cada una de ellas, aunque es probable que empezarán a generarse casi de forma simultánea. Este fallamiento se encuentra afectando a todo tipo de infraestructura: pavimentación de calles, casas, escuela, bardas, postes de alumbrado público y de teléfono, tumbas, banquetas, jardineras, etcétera.

En las viviendas o edificaciones, los daños principales que se encontraron fueron fracturamientos en: cimentaciones, dalas (o cadenas), muros de carga o columnas, paredes, techos, bardas y pisos. En ciertos lugares, este fracturamiento va desde la vialidad (calle o avenida), pasando por la guarnición y banqueta, hasta la pared o muro de separación, como se puede observar en la **Figura 59**. El tipo de grietas que se presentan en las paredes y/o muros de separación son en: diagonal y horizontal, principalmente; además diagonal escalonado y, solo localmente, vertical. También se detectó, al menos, una casa abandonada por el fracturamiento y peligro que representa para los habitantes de la misma, como se puede ver en las **figuras 46-48**.

En el caso del Panteón Municipal, aparte del fracturamiento en muchas de las tumbas, se localizaron 4 lápidas con hundimiento, presentando una inclinación de 5° al NE y un rumbo NW 83° SE, con desniveles entre 17 y 60 cm, como se pueden ver en las **figuras 51(a, b) y 52(a, b)**. Estos fracturamientos y hundimientos en dichas tumbas no están reportados por ningún autor.

Para la realización de los subcapítulos de Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia y Determinación Zona de Riesgo, se analizaron varios métodos cualitativos que se han implementado en otras ciudades del mundo para escoger el que mejor pudiera adaptarse de forma idónea a las condiciones locales.

Para el caso de la evaluación de la susceptibilidad de subsidencia se utilizó el criterio de evaluación propuesto por Julio *et al.* (2012), ya que hasta el momento es el que mejor describe

el agrietamiento debido al fenómeno de subsidencia, siendo de gran utilidad para asignar una clasificación de daño a las viviendas afectadas por dicho fenómeno, llegando a definir 3 tipos de daños para la parte norte de la Ciudad de Empalme, los cuales son: **severo, alto y moderado**, como se puede observar en la **Figura 63**; por lo que podemos concretar que el fracturamiento superficial asociado a subsidencia es dinámico, pues con el tiempo aparecen nuevas fracturas o se reactivan las ya existentes, provocando cambios en las condiciones iniciales de estabilidad mecánica del material. Es decir, el fenómeno de subsidencia, en términos generales, es un movimiento vertical lento de la corteza terrestre, en forma de hundimiento, con efectos a largo plazo, debido a que la magnitud de los hundimientos puede ser de sólo unos cuantos centímetros por año, surgiendo agrietamientos tanto superficiales (suelo y en todo tipo de infraestructura) como en el subsuelo, siendo éstos casi imperceptibles, sin embargo, al cabo de algunos pocos años, los asentamientos tienden a generar problemas, como por ejemplo cambios en el drenaje natural del área que se hunde. Este fenómeno puede ser originado por diversas causas, dependiendo del lugar donde se realice el estudio y/o análisis de éste. Mientras que para Herrera *et al.* (2013) la subsidencia es un tipo de colapso del terreno que se presenta en diversos lugares del mundo, caracterizado por una deformación casi vertical o el asentamiento de los materiales de la tierra de manera paulatina, manifestándose en zonas urbanas y rurales mediante daños y agrietamientos en inmuebles e infraestructura en general, así como hundimientos diferenciales y agrietamientos de la superficie del suelo.

En cuanto a los hundimientos en la zona de estudio, no son percibidos si no hasta que ocasionan cambios en el drenaje natural superficial e inundaciones durante la temporada de lluvias. Es muy posible que el proceso de hundimiento en la zona comenzará varios años antes de que los agrietamientos se hicieran evidentes. Asimismo, en el largo plazo, los daños económicos asociados a este fenómeno son alarmantes, principalmente para los propietarios, ya que la Ley de Catastro actual no considera ninguna disminución del impuesto predial para propiedades afectadas por este fenómeno y debido a que el fenómeno de subsidencia es un movimiento lento con efectos a largo plazo, como se mencionó en el párrafo anterior, no fue tomado en cuenta por el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) y en el Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Empalme (2011) concluyen que para el caso de hundimientos (subsidencia) se presenta como un peligro **muy bajo** en el municipio, localizándose puntos (sin especificar lugar) donde pudiera incrementar la probabilidad de ocurrencia, sin que esto represente una amenaza a los asentamientos humanos existentes.

Para la determinación de la zona de riesgo en este estudio, se evaluó al riesgo de forma cualitativa a partir de la vulnerabilidad y del peligro, donde para la primera se consideró todo aquello que es susceptible a sufrir algún daño (infraestructura urbana, ecosistemas, vías de comunicación, cambios en el gradiente que afecta al flujo del drenaje natural) y para el segundo se consideraron los fenómenos geológicos con una concatenación, como se puede ver en la **Figura 74**. Por lo que para evaluar el grado de riesgo en el que se encuentra el área de estudio, fue considerada la vulnerabilidad como el daño estructural a la vivienda a partir de los índices de daño propuestos por Park *et al.* (1993), observados después de la ocurrencia de un sismo; mientras que para el peligro se estimó a partir de la velocidad de propagación de la onda sísmica (PGA).

Con base a esta correlación, ID y PGA, se pudo determinar el mapa de riesgo para la parte norte de Empalme, como se muestra en la **Figura 76**, donde se pueden observar 6 polígonos con los siguientes 3 riesgos: **severo**, que corresponde al 23% del área (Colonia Juárez, 20%, y Panteón Municipal, 3%); **moderado**, con el 45% del área (Colonia Moderna Norte, 25%, y Colonia Centro, 20%); y **menor**, con el 32% (Colonia Juárez, 12%, y Colonia Centro, 20%). Y al correlacionar la gráfica de ID, la tabla de aceleraciones para distintos sismos a diferentes distancias para Empalme y la tabla de intensidades de Mercalli, PGA y PGV, nos permitió conocer el daño que pueden alcanzar las edificaciones para eventos de distintas intensidades sísmicas y que en el caso de que se llegará a presentar un sismo de magnitud 5.7 en la Escala de Richter, con un epicentro a 25 km de distancia, se tendría un PGA de 0.083, con una velocidad sísmica entre 3.4-8.1 cm/s, por lo que el temblor se sentiría con una intensidad de V (moderado) en la Escala de Mercalli, produciendo un índice de daño de 0.4 (moderado) a 0.8 (severo) y con un potencial de daño a las edificaciones muy leve. También nos permitió identificar que la onda sísmica viajará más lentamente entre más alejado esté el epicentro, llegando a su destino con menor fuerza, por lo que el daño para la infraestructura sería mínimo con respecto a un epicentro cercano, pero sí generando movimiento o vibración en fallas y fracturas. El IPN (s/f) comenta que los fenómenos sísmicos relacionados con la forma de respuesta local que tienen las estructuras geológicas pueden ocasionar modificaciones a la dinámica de las ondas sísmicas por reflexión, refracción y absorción, generándose una situación de cambio en tiempo y espacio en la intensidad y comportamiento de dichas ondas en la superficie, lo que provoca efectos diferenciales en el emplazamiento urbano.

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Todos estos resultados corresponden a una evaluación global del área de estudio, sin incluir los deterioros por otro tipo de factores.

Tanto la amenaza como la exposición no pueden ser reducidas, ya que son fenómenos naturales que existen; lo que ayuda a la evaluación es tener el diagnóstico y con el resultado tratar de reducir la vulnerabilidad o susceptibilidad para que también el riesgo baje. Para los escenarios urbanos se debe, por lo tanto, determinar no solamente el tipo y características de la amenaza potencial sobre la ciudad, sino también la respuesta y el nivel de daño de la misma. Por lo tanto, es muy importante tener en cuenta que los resultados obtenidos no representan de ninguna manera valores absolutos de pérdidas, sino que son tendencias de lo que eventualmente podría esperarse en el caso dado de que se genere un sismo de las características mencionadas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Debido a la escasa o casi nula información encontrada sobre subsidencia en la zona de Empalme, fue necesario, a partir de la recopilación bibliográfica, identificar similitudes geológicas y estructurales con otras ciudades del mundo, para poder comprender el funcionamiento de este fenómeno.

De acuerdo con los resultados obtenidos, tanto en el levantamiento de datos estructurales como en el de geofísica, así como el análisis en la evaluación de la susceptibilidad de subsidencia y la zona de riesgo, se establece que en la parte norte de la Ciudad de Empalme se está presentando el fenómeno de subsidencia, pues dichos resultados y análisis proveen elementos de decisión de vital importancia para la determinación del potencial o índice de daño a la infraestructura urbana de servicios y estructuras civiles, debido al proceso de hundimiento, como ya se hizo mención, que presenta el área.

La subsidencia en la parte norte de Empalme puede estar generada por uno o la combinación de dos o más de los siguientes factores, generando movimientos de neotectónica:

1. Diferencia de fallas en escalón por asentamiento diferencial, impulsado por sismos lejanos
2. Falla activa
3. Reactivación de fallas
4. Asentamientos por diferencia de suelos o composición del material
5. Licuefacción impulsada por sismicidad lejana
6. Asentamientos producto de la actividad humana
7. Horizontes de arena (boudinaje) o paleocanales
8. Resistencia de fallas preexistentes que pueden tener sistemas acuíferos
9. Sobreexplotación de acuíferos

Sin embargo, al identificar: a) la presencia de estructuras sepultadas que coinciden con la presencia superficial de evidencias de subsidencia, b) una zona de susceptibilidad sísmica

moderada, y c) la ausencia de una sobreexplotación acuífera importante, se considera que la principal causa es sismo estructural.

La contribución que resulta de este estudio es un diagnóstico de la vulnerabilidad que existe por el riesgo que está afectando a la parte norte de Empalme, Sonora, por subsidencia y por sismo. El desconocimiento de los mecanismos, factores, consecuencias y zonas afectadas hace que aumente la vulnerabilidad ante el fenómeno. Por ello, los resultados presentados son un aporte en el conocimiento de su distribución espacial que plantea un panorama general de la subsidencia del terreno y que pretende identificar zonas prioritarias, bien sea para la realización de estudios detallados, como, por ejemplo, insumo para el atlas de riesgo, o para una adecuada planeación y ordenamiento del territorio.

En general, las posibilidades de reducir los riesgos sísmicos dependen de varios factores, entre los cuales se consideran más relevantes: la calidad y capacidad de resistencia sísmica del ambiente construido, en particular del patrimonio habitacional; la funcionalidad de las instalaciones esenciales después de un evento; y el grado de preparación de la ciudadanía y del sistema de atención a las emergencias.

Independientemente del nivel de riesgo, la naturaleza destructiva de los fenómenos sísmicos nos obliga a tomar todas las precauciones posibles para no incrementar el trágico historial de eventos desastrosos que ya caracteriza al país. Es decir, el conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente permite definir tanto la acción que debe considerarse en el diseño de nuevas estructuras como el sitio donde pueden ser construidas, de tal forma que las condiciones de los emplazamientos sean óptimas; esto es, alejados de las fallas, evitando los rellenos, los lugares con posibles asentamientos o deslizamientos y los de alto potencial de licuefacción.

Por último, los resultados que aquí se muestran constituyen una herramienta de gran utilidad al permitir incorporar el proceso de subsidencia y su fallamiento asociado como un elemento de consideración más en los planes de protección civil, de mantenimiento de infraestructura urbana y en los escenarios de desarrollo y su uso de suelo.

5.2. Recomendaciones

- Realizar un estudio cuantificando el daño estructural en las edificaciones provocado por subsidencia y por sismo, así como el total de casas afectadas por los mismos.
- Efectuar una actualización de monitoreo de hundimiento del terreno cada 2 años, así como atención a los habitantes de esta ciudad con el apoyo de brindar información para que estén preparados a cualquier evento sísmico o de cualquier amenaza que pueda afectar materialmente las viviendas y las vidas de los ocupantes.
- Se recomienda investigar una combinación de materiales que contribuyan a la susceptibilidad y que, al mismo tiempo, sean resistentes en un sistema estructural que funcione ante asentamientos diferenciales y con un diseño sísmico que brinde la seguridad estructural para un posible sismo.
- Se recomienda establecer elementos y normas de construcción para zonas sísmica..

8. BIBLIOGRAFÍA

Abidin, Hasanuddin Z., Andreas, Heri, Gumilar, Irwan, Fukuda, Yoichi, Pohan, Yusuf E., and Deguchi, T. (2011). Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Relation with Urban Development. *Nat Hazards* (2011), 59: 1753-1771, doi: [10.1007/s11069-011-9866-9](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9).

Abidin, Hasanuddin Z., Andreas, Heri, Gumilar, Irwan, Sidiq, Teguh P., and Fukuda, Yoichi (2013). On the Roles of Geospatial Information for Risk Assessment of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia. S. Zlatanova *et al.* (eds.), *Intelligent Systems for Crisis Management, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, doi: [10.1007/978-3-642-33218-0_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33218-0_19).

Abidin, Hasanuddin Z., Andreas, Heri, Gumilar, Irwan, Yuwono, Bambang D., Murdohardono, Dodid, and Supriyadi, S. (2015). On Integration of Geodetic Observation Results for Assessment of Land Subsidence Hazard Risk in Urban Areas of Indonesia. C. Rizos, P. Willis (eds.), *IAG 150 Years, International Association of Geodesy Symposia 143*, doi: [10.1007/1345_2015_82](https://doi.org/10.1007/1345_2015_82).

Allan, J.F., Nelson, S.A., Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E. and Wopat, M. (en prensa). Pliocene-Recent Rifting in SW Mexico and Associated Alkaline Volcanism. *In* Dauphin, J.P., ed., *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, Am. Assoc. Petroleum Geologists, Mem.

Antsiferov, A., Glukhov, O., and Antsiferov, V. (2006). Experience in Solving Problem to Control Surface Subsidence Displacement in Urban Areas on the Basis of the Special-Purpose Geoinformation System "Geomark". *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 41 (3-4), pp. 317-322 (2006), doi: [10.1556/AGeod.41.2006.3-4.4](https://doi.org/10.1556/AGeod.41.2006.3-4.4).

Aragón-Arreola, M.A. and Martín-Barajas, A. (2007). Westward Migration of Extension in the Northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35, 571-574, doi: [10.1130/G23360A.1](https://doi.org/10.1130/G23360A.1).

Aranda Gómez, J.J., Henry, C.D. y Luhr, J.F.(2000). Evolución Tectonomagmática Post-Paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la Porción Meridional de la Provincia

Tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIII, 59-71.

Aranda Gómez, J.M. y Aranda Gómez, J.J. (1986). Análisis del Agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes. Univ. Autón. Aguascalientes, 104 p. (informe inédito).

Arzate F., Jorge, Barboza G., Rafael, López D., Rubén, Pacheco Martínez, Jesús, Mata S., José Luis, Del Rosal, Antonio, Peña Díaz, Ienisei y Olivares, Carlos (2006). Estudio Geológico-Geofísico para la Evaluación de los Hundimientos y Agrietamientos en el Área Metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. Informe Final, San Luis Potosí, julio del 2006.

Ávila-Olivera, J.A. y Garduño-Monroy, V.H. (2003). Estudios Geotécnicos y Geofísicos de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla en la Ciudad de Morelia, Michoacán. Geos, Vol. 23, No. 2, p. 138-139, citado por Iztapalapa (2011).

Ávila Olivera, Jorge Alejandro¹, Calderón Muñoz, Jorge² y Garduño Monroy, Víctor Hugo² (2007). Monitoreo de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla que Afectan a la Ciudad de Morelia, Michoacán, Empleando DGPS Geodésico. Sesión Especial, Estudios Geológicos y Geofísicos de Riesgos Naturales; organizador: Carlos Suárez; Geos, Vol. 27, No. 1, octubre, 2007, SE02-18; ¹Instituto de Geofísica, UNAM; ²Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH.

Barbat, H., Oller, S. y Vielma, J.C. (2005). Cálculo y Diseño Sismorresistente de Edificios. Aplicación de la Norma NCSE-02. Monografía CIMNE IS56, Barcelona, España, Editor A.H. Barbat.

Barker, R.D. (1989). Depth of Investigation of Collinear Symmetrical Four Electrode Arrays. Geophysics, 54, 1031-1037.

Barker, R.D. (1992). A Simple Algorithm for Electrical Imaging of the Subsurface. First Break, v. 10, 2, p. 53-62.

Barrera-Guerrero, S. y Vidal-Solano, J.R. (2010). Reconocimiento del Volcanismo Hiperalkalino de Edad Mioceno Medio en el NW de México. Un Registro Completo en la Sierra Libre,

Sonora, México; *en* XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos, México; *Actas INAGEQ*, 16(1), 229-234.

Bartolini, C., Damon, P., Shafiqullah, M. and Morales, M. (1994). Geochronologic Contributions to the Tertiary Sedimentary-Volcanic Sequences ("Baucarit Formation") in Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional*, 33, 67-77.

Bonachea Pico, J. (2006). Desarrollo, Aplicación y Validación de Procedimientos y Modelos para la Evaluación de Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo Debidos a Procesos Geomorfológicos. Tesis Doctoral, Santander, España, Universidad de Cantabria.

Brunori, Carlo Alberto, Bignami, Christian, Zucca, Francesco, Groppelli, Gianluca, Norini Gianluca, Dávila Hernández, Norma, and Stramondo, Salvatore (2015). Ground Fracturation in Urban Area: Monitoring of Land Subsidence Controlled by Buried Faults with InSAR Techniques (Ciudad Guzmán: México). *In* G. Lollino *et al.* (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*, doi: [10.1007/978-3-319-09048-1_196](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_196).

Burbey, T.J. (2002). The Influence of Faults in Basin-Fill Deposits on Land Subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10, p. 525-538.

Calmus, T., Aguillón Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J. and Michaud, F. (2003). Spatial and Temporal Evolution of Basalts and Magnesian Andesites (Bajaites"), from Baja California, México. Constraints on their Tectonic Setting and Origin, *Lithos*, 66, 77-105.

Calmus, T., Poupeau, G., Defaux, J. and Labrin, E. (2000). Basin and Range and Gulf of California Tectonics: Contribution of an Apatite Fission-Track Study. (Resumen), *in* Calmus, T., Pérez Segura, E. (eds.), *Cuarta Reunión sobre la Geología del Noroeste de México; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste y Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Libro de Resúmenes, Publicaciones Ocasionales*, 2, 13-14.

Campos Coy, G., Ortega Gurrero, A. y Medina B., R. (1984). Ampliación al Estudio Geofísico del Valle de Guaymas, Sonora, México. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, reporte no publicado, 32 p.

Cano-Saldaña¹, Leonardo, Monsalve-Jaramillo¹, Hugo, Agudelo-Calvo¹, Jairo Andrés, Upegui-Botero, Fabio Mauricio y Jaramillo-Fernández², Juan Diego (s/f). Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico de Pequeñas y Medianas Ciudades. Estudio de Caso: Zona Centro de la Ciudad de Armenia - Colombia. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol. 5(1) 3; ¹Centro de Estudios e Investigaciones, Facultad de Ingeniería - CEFI - Universidad del Quindío, Armenia (Q)-Colombia; ²Facultad de Ingeniería - Universidad EAFIT, Medellín-Colombia.

Cárdenas Valencia, Juan David y Galvis García, Esteban (2011). Manual para la Interpretación del Perfil de Resistividad Obtenido al Realizar el Estudio de la Resistividad del Suelo a Partir de las Configuraciones del Método de Wenner. Facultad de Tecnologías, Programa de Tecnología Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Tesis Profesional, Pereira, 2011.

Cardona, O.D. (2003). La Necesidad de Repensar de Manera Holística los Conceptos de Vulnerabilidad y Riesgo. “Una Crítica y una Revisión Necesaria para la Gestión”. Bpogotá, Colombia; Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED.

Carreón Freyre, D.C. (2011). Identificación y Caracterización de los Diferentes Tipos de Fracturas que Afectan el Subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Academia de Ingeniería, A.C., México, 52 p., citado por Delegación Iztapalapa (2011).

Carreón Freyre, Dora Celia, Barajas Nigoche, Daniel, Cafaggi Félix, Francisco, Ibarra Olivares, Guadalupe, Mata Segura, José Luis, León Rivera, Andrés, Rosales Tapia, Ana Rosa, González Grijalva, Marco David, Ortiz Villaseñor, Ignacio y Álvarez Manilla, Alfonso (2009). Integración Metodológica para la Elaboración de la Cartografía de Ingeniería Geológica de Zonas Urbanas: Ciudad de Querétaro y Ciudad de San Luis Potosí. Proyecto de colaboración Centro de Geociencias UNAM-Servicio Geológico Mexicano, informe final.

- Castillo Gurrola, J., Morales Montaña, M., Rangel Medina, M. y Monreal Saavedra, R. (2000). Estudio Geohidrológico del Acuífero de la Costa de Hermosillo, (Resumen), Hermosillo, Sonora. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Semana Cultural, s/n de página.
- Chaussard, Estelle, Wdowinski, Shimon, Cabral Cano, Enrique, and Amelung, Falk (2013). Land Subsidence in Central México Detected by ALOS InSAR Time-Series. *Remote Sensing of Environment, Journal*, 140 (2014), 94-106, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038>.
- Chávez Alegría, Omar (2008). Modelación Físico-Experimental del Fenómeno de Subsistencia. Tesis de Maestría, Santiago de Querétaro, Querétaro, UAQ, 2008.
- Chelotti, L., Acosta, N., and Foster, M. (2010). Métodos Electromagnéticos y de Polarización Inducida. Cátedra de Geofísica Aplicada, U.N.P.S.I.B., Chubut, Argentina.
- Cinque, Aldo, Irollo, Giolinda, Romano, Paola, Ruello, María Rosaria, Amato, Lucio, and Giampaola, Daniela (2010). Ground Movements and Sea Level Changes in Urban Areas: 5,000 Years of Geological and Archeological Record from Naples (Southern Italy). *Quaternary International, Journal*, 232 (2011), 45-55, doi: [10.1016/j.quaint:2010.06.027](http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2010.06.027).
- Cochemé, J.J. (1985). Le Magmatisme Dans le Nord-Ouest du Mexique. Cartographie de la Région de Yécora-Maicoba-Mulatos. Illustration Magmatique de la Fin d'un Régime en Subduction et du Passage à un Régime Distensif. Thèse Doct. Etat Univ. Aix-Marseille III, 209 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA; 2009). Actualizaciones de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea del Acuífero Valle de Guaymas.
- Damon, P.E. (1978). Mineralization in Time and Space in Northwestern Mexico and Southwestern United States. I Simposio sobre la Geología y Potencial Minero del Estado de Sonora; Instituto de Geología, UNAM; Resúmenes, p. 41-44.
- Damon, P.E., Clark, K.F., Shaffiquillah, M., Roldan, Q.J., and Islas, L.J. (1981). Geology and Mineral Deposits of Southern Sonora and the Sonoran Sierra Madre Occidental. *In: Geology*

of Northwestern Mexico and Southern Arizona, Field-Guides and Papers; Geol. Society of America; Annual Meeting, p. 369-426.

Damon, P.E., Shafiqulla, M. and Clark, K.F. (1983). Geochronology of the Porphyry Copper Deposits and Related Mineralization of México. Canadian Journal of Earth Sciences, 20 (6), 1052-1071.

Dang, V.K., Doubre, C., Weber, C., Gourmelen, N., and Masson, F. (2014). Recent Land Subsidence Caused by the Rapid Urban Development in the Hanoi Region (Vietnam) Using ALOS InSAR Data. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 657-674, 2014, doi: [10.5194/nhess-14-657-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-657-2014).

Daniels, F. and Alberty, R.A. (1966). Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Inc.

DeGroot Hedlin, C. and Constable, S. (1990). Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models from Magnetotelluric Data. Geophysics, v. 55, p. 1613-1624.

Díaz Anaya, Erika Pamela (2010). Implementación del Código ZONDRES2D para la Modelación Directa e Inversa de Datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Profesional, 2010.

Dickinson, W.R. (1979). Cenozoic Plate Setting of the Cordilleran Region in the United States. *In* Armentrout, J.M., Cole, M.R., and TerBest, H. Jr., eds., Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera; Arizona Geol. Soc. Digest, v. 14, p. 113-135.

Dickinson, W.R. (1989). Tectonic Setting of Arizona through Geologic Time. *In* Jenney, J.P. and Reynolds, S.J., eds.; Geologic Evolution of Arizona, Tucson, Arizona Geol. Society Digest 17, p. 1-16.

Dokka, R.K. and Merriam, R.H. (1982). Late Cenozoic Extension of Northeastern Baja California, México. Geological Society of America, Bulletin, 93, 371-378.

Domínguez de la Rasilla, S., Díaz Curiel, J., Rozycki, A. y Maldonado Zamora, A. (1988). El Método de Polarización Inducida como Técnica de Apoyo al Estudio de las Intrusiones

Marinas: Aplicación a los Acuíferos de Almuñecar y Castell de Ferro (Granada). Departamento de Ingeniería Geológica, Cátedra de Geofísica Aplicada, E.T.S.I. de Minas, Universidad Politécnica de Madrid.

Dos Santos, Sylvana Melo, da Silva Pereira Cabral, Jaime Joaquim, and da Silva Pontes Filho, Ivaldo Dario (2012). Monitoring of Soil Subsidence in Urban and Coastal Areas Due to Groundwater Overexploitation Using GPS. *Nat. Hazards* (2012), 64: 421-439, doi: [10.1007/s11069-012-0247-9](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0247-9).

Edwards, L.S. (1977). A Modified Pseudosection for Resistivity and Induced-Polarization. *Geophysics*, v. 42, p. 1020-1036.

El Banna, Mahmoud M. and Frihy, Omran E. (2008). Human-Induced Changes in the Geomorphology of the Northeastern Coast of the Nile Delta, Egypt. *Geomorphology, Journal*, 107 (2009), 72-78, doi: [10.1016/j.geomorph.2007.06.025](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.025).

Elston, W.E. (1976). Tectonic Significance of Mid-Tertiary Volcanism in the Basin and Range Province. A Critical Review with Special Reference to New Mexico, *in* Elston, W.E., Northrop, S.A., eds., *Cenozoic Volcanism in Southwestern New Mexico; Socorro; New Mexico Geological Society Special Publication No. 5*, p. 93-102.

Fazzito, Sabrina Yesica (2011). Estudios Geofísicos Aplicados a la Neotectónica de la Falla El Tigre, Precordillera de San Juan. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Biblioteca Digital FCEN-UBA, Tesis Doctoral, 2011.

Fernández Enríquez, Rebeca y Cantillo Riverí, Leonardo (2011). Empleo del Georadar y Métodos Eléctricos: Sondeo Eléctrico Vertical y Perfilaje Eléctrico Simétrico en la Detección de Cavernas en Partes del Vial Albaiza-Sola. VI Congreso Cubano de Geofísica (Geofísica 2011), Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Geociencias 2011, La Habana, del 4 al 8 de abril del 2011, ISBN 978-959-7117-30-8.

Ferrario, M.F., Bonadeo, L., Brunamonte, F. Livio, F., and Michetti, A.M. (2015). A Model of Como (N Italy) Urban Subsurface: A Multidisciplinary Tool for Hydraulic, Hydrogeologic and

Subsidence Risk Management. In G. Lollino *et al.* (eds.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5, doi: [10.1007/978-3-319-09048-1_174](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_174).

Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., and Gehrels, G.E. (2007). Ridge-Trench Interactions and the Neogene Tectonic Evolution of Magdalena Shelf and Southern Gulf of California: Insights from Detrital Zircon U-Pb Ages from the Magdalena Fan and Adjacent Areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119(11/12), 1313-1336.

Font, X., Serra, J. y Pinto, V. (1995-1996). Los Riesgos Geológicos en la Ordenación Territorial. Barcelona, España, *Acta Geológica Hispánica*, v. 30 (1995), no. 1-3, p. 83-90 (Pub. 1996), Dpto. de Geoquímica, Petrología y Prospección, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.

Galloway, D., Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E. (eds.; 1999). Land Subsidence in the United States. Circular 1182, U.S. Geological Survey, Part IV, The Role of Science.

Gans, P.B. (1997). Large Magnitude Oligo-Miocene Extension in Southern Sonora: Implications for the Tectonic Evolution of Northwest México. *Tectonics*, 16, 388-408.

Gans, P.B., MacMillan, I., Wong, M., and Roldán Quintana, J. (2003). Structural and Magmatic Evolution of the Sonoran Rifted Margin. A Preliminary Report, in 99th Annual Meeting, Cordilleran Section, Geological Society of America, Puerto Vallarta, Jalisco, México, April 1-3, 2003; *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 35 (4), p. 21.

Gastil, G. and Krummenacher, D. (1977). Reconnaissance Geology of Coastal Sonora Between Puerto Lobos and Bahía Kino. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 189-198.

Geological Survey (USGS). Subsidence Interest Group Conference, Proceedings of the Technical Meeting, Galveston, Texas, November 27-29, 2001.

Geological Survey (USGS). Ground-Water Resources for the Future. Land Subsidence in the United States. Fact Sheet-165-00, December 2000.

González Enríquez, Rodrigo¹ y Castillo Acosta, Leticia Guadalupe² (?). Los Recursos Hidráulicos de Sonora: Un Análisis de su Calidad y Contaminación, en un Contexto de Planeación Estratégica para su Desarrollo Sustentable. ¹Instituto Tecnológico de Sonora; Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora.

González O., R.A. (2003). Métodos Geoeléctricos. Geofisi-k, Bolivia, 1° ed. 180 pp.

González Piña, Juan Manuel (2014). Delimitación Aeromagnética del Bloque Jalisco: Implicaciones Geohidrológicas en Tequila, Jalisco. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Posgrado en Geociencias Aplicadas, Tesis de Maestría, San Luis Potosí, febrero del 2014.

Griffiths, D.H. and Barker, R.D. (1993). Two-Dimensional Resistivity Imaging and Modelling in Areas of Complex Geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, No. 3/4, 211-226.

Griffiths, D.H., Turnbull, J., and Olayinka, A.I. (1990). Two-Dimensional Resistivity Mapping with a Computer-Controlled Array. *First Break* 8, 121-129.

Hallof, P.G. (1957). On the Interpretation of Resistivity and Induced Polarization Measurements. Ph.D. Thesis, MIT.

Hamilton, W. (1969). Mesozoic California and the Underflow of Pacific Mantle. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, V. 80, No. 12, p. 2409-2430.

He, Sun, Qin, Zhang, Chaoying, Zhao, Chengsheng, Yang, Qifa, Sun, and Weiran, Chen (2016). Monitoring Land Subsidence in the Southern Part of the Lower Liaohe Plain, China, with a Multi-Track PS-InSAR Technique. *Remote Sensing of Environment, Journal*, 188 (2017), 73-84, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.037>.

Helenes, J. and Carreño, A.L. (1999). Neogene Sedimentary Evolution of Baja California in Relation to Regional Tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 589-605.

- Helenes, J., Carreño, A.L., and Carrillo, R.M. (2009). Middle to Late Miocene Chronostratigraphy and Development of the Northern Gulf of California. *Marine Micropaleontology*, 72, 10-25, doi:10.1016/j. marmicro.2009.02.003.
- Henry, C.D. (1989). Late Cenozoic Basin and Range Structure in Western México and Adjacent to the Gulf of California, México. *Geological Society of America, Bulletin*, 101, 1147-1156.
- Henry, C.D. and Aranda-Gómez, J.J. (2000). Plate Interactions Control Middle-Late Miocene Proto-Gulf and Basin and Range Extention in the Southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318, 1-26.
- Herrera Pérez, Iván Leonardo (2012). Análisis de la Susceptibilidad a la Subsistencia en el Estado de San Luis Potosí (México) como Herramienta de la Gestión Ambiental. Tesis de Maestría, San Luis Potosí, S.L.P., UASLP, 2012.
- Holt, J.W., Holtt, W.E., and Stock, J.M. (2000). An Age Constraint on Gulf of California Rifting from the Santa Rosalía Basin, Baja California Sur, México. *Geological Society of America Bulletin*, 112, 540-549.
- Holzer, Thomas L. and Johnson, A. Ivan (1985). Land Subsidence Caused by Ground Water Withdrawal in Urban Areas. *GeoJournal*, 11.3, 245-255.
- Humphreys, E.D. and Weldon, R.J. (1986). Pacific-North American Relative Motion in Southern California. *EOS, American Geophysical Union Transactions*, v. 67, p. 905.
- Iglesias, J., Robles, F., De la Cera, J. y González, O. (1988). Manual de Reparación de Estructuras de Concreto y Mampostería. Primera Edición, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, D.F.
- Ingle, J.C. (1973). Neogene Marine History of the Gulf of California. (Abs); *GSA Abstracts with Programs*, v. 5, p. 62.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; 2002). Continuo Nacional, Escala 1:1'000,000, Provincias Fisiográficas.
-

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; 2002). Continuo Nacional, Escala 1:1'000,000, Subprovincias Fisiográficas.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; 2002). Continuo Nacional, Escala 1:1'000,000, Sistemas de Topoformas.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; 2004). Continuo Nacional, Escala 1:1'000,000, Geología.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI; 2014). Mapa de Susceptibilidad del Fenómeno de Subsistencia en el Bajío Guanajuatense.

Inman, J.R. (1975). Resistivity Inversion with Ridge Regression. *Geophysics*, 40: 798-817.

IPN (s/f). Manifestación de Impacto Ambiental: "Libramiento de 4.5 km del Poliducto de 8"-6" Terminal Satélite Oriente (Añil)-TAR Cuernavaca sobre Av. Canal de Garay, en la Delegación Iztapalapa". IPN, Distrito Federal.

Iris Instruments (2010). ElectrePro@ Software: User Manual. www.iris-instruments.com.

Ivanich, P.A., Tyburczy, J.A., Arrowsmith, J.R., Diaz, M. (2003). Measuring Bedrock Topography Using Gravity to Understand Subsidence Along a Portion of the CAP Canal in Northeast Scottsdale. CAP-LTER 2003 5th Annual Poster Symposium.

Jachens, C.R. and Holzer, L.T. (1979). Geophysical Investigations of Ground Failure Related to Ground Water Withdrawal Picacho Basin Arizona. *Ground Water*, vol. 17, no. 6, p. 574-585.

Jixian, Zhang, Jiping, Liu, Liang, Zhai, and Wei, Hou (2016). Implementation of Geographical Conditions Monitoring in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2016, 5, 89; doi: [10.3390/ijgi5060089](https://doi.org/10.3390/ijgi5060089).

Johansen, O. (1975). Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. Thesis, Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, 1977), ADA 044002.

Johnpeer, G.D. (1977). Reconnaissance Geology and Petrology of the Guaymas Area, Sonora, México. Tempe, Arizona, Arizona State University, M.Sc. thesis, 67 p.

Joyner, W.B. and Boore, D.M. (1981). Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am. 71, 2011-2038.

Juárez Valencia, Manuel Jesús y Laoyza Rodríguez José Germán (2015). Análisis y Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica y Estados de Daño en Monumentos Históricos de Sillar en el Barrio de San Lázaro - Arequipa. Universidad Católica de Santa María, Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente, Escuela Profesional de Ingeniería Civil; Tesis; Arequipa, Perú.

Julio-Miranda, P., Ortiz-Rodríguez, A.J., Palacio-Aponte, A.G., López-Doncel, R., and Barboza-Gudiño, R. (2012). Damage Assessment Associated with Land Subsidence in the San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sanchez metropolitan Area, Mexico, Elements for Risk Management". Natural Hazards, 64, 751-765.

Jun Su, Kim, Duk Jin, Kim, Sang Wan, Kim, Joong Sun, Won, and Wooil M., Moon (2007). Monitoring of Urban Land Surface Subsidence Using PSInSAR. Geosciences Journal, Vol. 11, No. 1, p. 59-73, March 2007.

Jun, Wang, Wei, Gao, Shiyuan, Xu, and Lizhong, Yu (2012). Evaluation of the Combined Risk of Sea Level Rise, Land Subsidence, and Storm Surges on the Coastal Areas of Shanghai, China. Climatic Change (2012), 115: 537-558, doi: [10.1007/s10584-012-0468-7](https://doi.org/10.1007/s10584-012-0468-7).

Karig, D.E. and Jensky, W. (1972). The Protogulf of California. Earth Planetary Science Letters, 17, 169-174.

Keller, E.A. y Blodgett, R.H. (2007). Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra como Riesgos, Desastres y Catástrofes. Madrid, España, Pearson, Prentice-Hall.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966). Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford, 519 p.

- Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, 419 pp.
- Kuenzer, Claudia, Dech, Stefan, and Wagner, Wolfgang (2015). *Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics*. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Volume 22, Springer International Publishing Switzerland, doi: [10.1007/978-3-319-15967-6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15967-6).
- Leal-Rubio, Oscar (2017). *Evaluación de Vulnerabilidad de Viviendas Afectadas por Hundimientos en Función de los Tipos de Materiales Empleados en el Pueblo de Jocotepec, Jalisco*. Trabajo de Obtención de Grado, Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables; Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Repositorio Institucional del ITESO, Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano.
- Lee, T. (1972). A General Technique or the Direct Interpretation of Resistivity Data over Two-Dimensional Structures. *Geophysical Prospecting*, 20, 847-849.
- Leonard, R.J. (1929). An Earth Fissure in Southern Arizona. *J. Geol.*, 37(8), 765-774.
- Lesser Illades, Juan Manuel¹, Cortés Pérez, Miguel Ángel² (?). *El Hundimiento del Terreno, una Consecuencia de la Sobreexplotación de Acuíferos*. ¹Lesser y Asociados, S.A. de C.V.; ²Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica-GDF.
- Leucci, Giovanni (2007). Geoscientific Investigations for Mapping the Subsidence Risk in an Urban Area. *J. Geophys. Eng.*, 4 (2007), 317-331, doi: [10.1088/1742-2132/3/S11](https://doi.org/10.1088/1742-2132/3/S11).
- Lixin, Yi, Fang, Zhang, He, Xu, Shijie, Chen, Wei, Wang, and Qiang, Yu (2010). Land Subsidence in Tianjin, China. *Environ. Earth Sci.* (2011), 62: 1151-1161, doi: [10.1007/s12665-010-0604-5](https://doi.org/10.1007/s12665-010-0604-5).
- Llorente, M. y Laín, L. (2009). *Riesgos Geológicos: Técnicas de Análisis y Mitigación*. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 232-241.
- Loke, M.H. (1996-2002). *Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys*. Geotomo Software.

- Loke, M.H. (2004). Tutorial: 2D and 3D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software, Malasia.
- Loke, M.H. (2010). 2D and 3D Electric Imaging Surveys. Geotomo Software Sdn Bsd, Malaysia.
- Loke, M.H. and Baker, R.D. (1995). Least-Squares Deconvolution of Apparent Resistivity Pseudosection. *Geophysics*, v. 60, p. 1682-1690.
- Loke, M.H. and Baker, R.D. (1996). Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by Quasi-Newton Method. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 131-152.
- Loke, M.H. and Baker, R.D. (1996a). Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections Using a Quasi-Newton Method. *Geophysical Prospecting*, v. 44, p. 131-152.
- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996b). Practical Techniques for 3D Resistivity Surveys and Data Inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.
- Loke, M.H., and Dahlin, T. (2002). A Comparison of the Gauss-Newton and Quasi-Newton Methods in Resistivity Imaging Inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162.
- Loke, M.H., López, H.A., Fanton, G.O. y Cara, R.E. (2002). Técnicas Prácticas para Investigación de Resistividad en 2D y 3D. Geotomo Software, Malasia.
- Lonsdale, P. (1991). Structural Patterns of the Pacific Floor Offshore of Peninsular California. *In* Dauphin, J.P. and Simoneit, B. (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 47, 87-125.
- López Hidalgo, Andrés Antonio¹, Loke, Meng Heng², Fanton, Gerardo Oscar¹ y Cara Rubí, Enrique¹ (?). Técnicas Prácticas para Investigación de Resistividad en Dos y Tres Dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D). ¹Instituto Geofísico Sismológico Ing. F.S. Volponi, Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan; ²School of Physics, University of Science of Malaysia, Penang, Malaysia, University Sains Malaysia.

- Luna De Anda, Christian Montserrat (2013). Métodos de Prospección Eléctrica Aplicados a la Detección de Discontinuidades Estructurales. Instituto Politécnico Nacional, ESIA-TICOMAN, Ciencias de la Tierra, Tesis Profesional, 2013.
- Lylle, M. and Ness, G.E. (1991). The Opening of the Southern Gulf of California. Eds. Dauphin, J.P., Simoneit, R.T.; The Gulf and Peninsular Province of the Californias; AAPG Memoir 47, p. 403-423.
- Maldonado, E. y Chio, G. (2009). Estimación de las Funciones de Vulnerabilidad Sísmica en Edificaciones en Tierra / Assessment of Functions Seismic Vulnerability of Earth Building. Ingeniería y Desarrollo, (25), 180.
- Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959). El Subsuelo de la Ciudad de México. México, D.F., UNAM, Fac. de Ingeniería, Vol. I y II, 505 pp.
- Marschalko, Marian, Yilmaz, Işik, Kubečka, Karel, Bouchal, Tomáš, Bednárik, Martin, Drusa, Marián, and Bendová, Miroslava (2014). Utilization of Ground Subsidence Caused by Underground Mining to Produce a Map of Possible Land-Use Areas for Urban Planning Purposes. Arab. J. Geosci. (2015), 8: 579-588, doi: [10.1007/s12517-013-1250-5](https://doi.org/10.1007/s12517-013-1250-5).
- Martín Barajas, A. (2000). Volcanismo y Extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIII, 72-83.
- Martínez Retama, Silvia^{1,2}, Flores, Carlos¹ y Castillo Gurrola, José³ (2007). Saline Intrusion in Guaymas Valley, México, from Time-Domain Electromagnetic Soundings. Geofísica Internacional, ISSN 0016-7169, vol. 46, no. 3, México, jul./sep. 2007; ¹Departamento de Geofísica Aplicada, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE); ²Departamento de Geología, Universidad de Sonora; ³Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.
- Martínez Ruiz, V.J. (1984). Control Geológico Estructural del Agua Subterránea entre San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas. Univ. Autón. San Luis Potosí, Inst. Geología y Metalurgia, Folleto Técnico 97, 12 p.

- McDowell F.W. and Claubaugh, S.E. (1979). Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their Relation to the Tectonic History of Western Mexico. *Geol. Soc. Amer. Special Paper* 180, p. 113-124.
- McDowell, F.W., Roldán Quintana, J., and Amaya Martínez, R. (1997). Interrelationship of Sedimentary and Volcanic Deposits Associated with Tertiary Extension in Sonora, México. *Geological Society of America, Bulletin*, 109, 1349-1360.
- Mejía, Juan Ángel¹, Rodríguez, Ramiro², and Berlín, Joel³ (?). Hydrodynamic and Pollution of the Urban Aquifer System of Salamanca, Gto.: the Salamanca Case 1. ¹Consejo Técnico de Aguas Irapuato-Valle de Santiago; ²Instituto de Geofísica, UNAM; ³Dir. de Ecología, Municipio Salamanca.
- Mooney, Harold (1966). *Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures*. Interciencia Costanilla; Minneapolis, Minnesota, U.S.A., 34 p.
- Mora Álvarez, G. (1992). History of Cenozoic Magmatism in the Sierra Santa Úrsula, Sonora. The University of Texas at Austin, Austin, Texas, B.S. thesis, 153 p.
- Mora Álvarez, G. (1993). Relaciones Estratigráficas y Geocronológicas entre las Unidades Volcánicas de la Sierra Santa Úrsula, en Sonora, y el Magmatismo de la Región del Golfo de California. *In* Delgado Argote, L., Martín Barajas, A. (eds.), *Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México*; Monografía UGM, 1, 123-146.
- Mora Álvarez, G. and McDowell, F.W. (2000). Miocene Volcanism During Late Subduction and Early Rifting in the Sierra Santa Úrsula of Western Sonora, México. *In* Delgado Granados, H., Aguirre Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of México*; Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 334, 123-141.
- Mora Klepeis, G., McDowell, F.W., and Ortega Rivera, A. (1997). Late Miocene Felsic Volcanism in West-Central Sonora: An Expression of Rift or Subduction-Related Magmatism? Salt Lake City, Abstracts with Programs, Utah, Geological Society of America, Annual Meeting, A481.

- Mora Klepeis, G., Roldán Quintana, J., McDowell, F.W., and Ortega Rivera, A. (2003). Geochemistry and Tectonic Significance of Miocene Granitoids in Northwestern México. Seattle, Abstracts with Programs, Geological Society of America Annual Meeting, 34(7), p. 554.
- Mora Klepeis, Gabriela², Roldán Quintana, Jaime¹, Calmus, Thierry¹, Valencia Moreno, Martín¹ y Lozano Santacruz, Rufino³ (2004). El Graben de Empalme, Sonora, México: Magmatismo y Tectónica Extensional Asociados a la Ruptura Inicial del Golfo de California. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, 2004, p. 320-334. ¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, Apartado Postal 1039, 83000 Hermosillo, Sonora, México; Geology Department, The University of Vermont, Burlington, VT, 05405, EE.UU.; ³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D.F.
- Morandi, María, Aragón Arreola, Manuel, Delgado Argote, Luis A. y González Fernández, Antonio (2002). Evolución de las Cuencas Yaqui y Guaymas, a Partir de Interpretación de Sísmica de Reflexión Marina. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos, XI Congreso Venezolano de Geofísica, 17 al 20 de noviembre del 2002, Caracas, Venezuela.
- Mundry, E. and Homilus, J. (1972). Resistivity Measurements in Valleys with Elliptic Cross-Section. Geophysical Prospecting, 20, 341-362.
- Nagy, E.A. (2000). Extensional Deformation and Paleomagnetism at the Western Margin of the Gulf Extensional Province, Puertecitos Volcanic Province, Northeastern Baja California, México. Geological Society of America Bulletin, 112, 857-870.
- Nayak, S. and Zlatanova, S. (2008). Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters. Environmental Science and Engineering Subseries: Environmental Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Neuhaus, J.R., Cassidy, M.E., Krummenacher, D., and Gastil, R.G. (1998). Timing of Protogulf Extension and Transensional Rifting through Volcanic/Sedimentary Stratigraphy of S. W. Isla Tiburón, Gulf of California, Sonora, México. Geological Society of America, Cordilleran Section Abstract with Programs, 20 (3), p. 218.
-

- Newton, Alice, Carruthers, Tim J.B., and Icely, John (2011). The Coastal Syndromes and Hotspots on the Coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, Journal*, 96 (2012), 39-47, doi: 10.1016/j.ecss.2011.07.012.
- Noel, M. and Xu, B. (1991). Archaeological Investigation by Electrical Resistivity Tomography: A Preliminar Study. *Geophysical J. Int.*, 107, 95-102.
- Nourse, J.A. (1989). Geological Evolution of Two Crustal Scale Shear Zones, Part II: The Magdalena Metamorphic Core Complex. California Institute of Technology, Ph.D. Dissertation, 396 p.
- Nourse, J.A., Anderson, T.H., and Silver, L.T. (1994). Tertiary Metamorphic Core Complexes in Sonora, Northwestern Mexico. *Tectonics*, Vol. 13, No. 5, pp. 1161-1182.
- Olayinka, A.I. (1988). Microprocessor Controlled Resistivity Traversing and its Use in Borehole Siting in Basement Areas of Nigeria. Ph.D. Thesis, Univ. of Birmingham.
- Olguín-Villa, A.E. (2010). Estudio Físico y Químico del Volcanismo Hiperalkalino en la Región de Cataviña, Baja California. Universidad de Sonora, Tesis de Licenciatura, 84 pp.
- Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Segunda Edición, Biblioteca Técnica Phylips, Paraninfo, Madrid, Volumen 1.*
- Orellana, E. y Mooney, H.M. (1966). *Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos Verticales sobre Terrenos Estratificados. Interciencia, Madrid.*
- Orellana, Ernesto (1972). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Biblioteca Técnica Philips, Paraninfo, Madrid, España.*
- Organización Panamericana de la Salud (OPS; 1999). *Fundamentos para la Mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud. Washington, D.C., Serie Mitigación de Desastres, ISBN: 92 75 32304 6.*

Oskin, M., Stock, J., and Martín Barajas, A. (2001). Rapid Localization of Pacific-North America Plate Motion in the Gulf of California. *Geology*, 29, 459-462.

Pacheco Martínez, Jesús (2007). Modelo de Subsistencia del Valle de Querétaro y Predicción de Agrietamientos Superficiales. Tesis Doctoral, Juriquilla, Querétaro, UNAM, 2007.

Pacheco Martínez, Jesús, Ortiz Lozano, José Ángel, Zermeño De León, Mario Eduardo y Mendoza Otero, Enrique (2011). Líneas de Investigación Vigentes y Pertinentes en Subsistencia y Generación de Agrietamientos. Primer Foro Internacional en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos; Convergencias del Diseño y la Construcción; Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo, ISBN 978-607-8227-01-3, págs. 0-14, UAA, Aguascalientes, México.

Parasnis, D.S. (1997). Principles of Applied Geophysics. 5th Edition, Chapman and Hall, London, 104-176.

Paredes Maturano, Jorge (2007). Datos e Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en Áreas Rurales de los Departamentos de Beni y Pando, en la República de Bolivia. Proyecto de Suministro de Agua Potable en Áreas Rurales de los Departamentos de Beni y Pando, en la República de Bolivia; SUIGEN, S.R.L., Santa Cruz, noviembre del 2007.

Pazdirek, O. and Blaha, V. (1996). Examples of Resistivity Imaging Using ME-100 Resistivity Field Acquisition System. EAGE 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam.

Peng, J.B., Sun, X.H., Wang, W., and Sun, G.C. (2016). Characteristics of Land Subsidence, Earth Fissures and Related Disaster Chain Effects with Respect to Urban Hazards in Xi'an, China. *Environ. Earth Sci.* (2016), 75: 1190, doi: [10.1007/s12665-016-5928-3](https://doi.org/10.1007/s12665-016-5928-3).

Pérez Rocha⁽¹⁾, Luis Eduardo, Mena Hernández⁽¹⁾, Ulises, Tena Colunga⁽²⁾, Arturo y Mena Sandoval⁽³⁾, Enrique (2015). Espectros de Diseño Sísmico para la Nueva Versión del Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.; XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, del 24 al 27 de noviembre del 2015, Acapulco, Guerrero; ⁽¹⁾Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Ingeniería Civil; ⁽²⁾Universidad

Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales; ⁽³⁾Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Comisión Federal de Electricidad.

Pratesi, Fabio, Tapete, Deodato, Del Ventisette, Chiara, and Moretti, Sandro (2016). Mapping Interactions between Geology, Subsurface Resource Exploitation, and Urban Development in Transforming Cities Using InSAR Persistent Scatterers: Two Decades of Change in Florence, Italy. *Applied Geography, Journal*, 77 (2016), 20-37, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.017>.

Prol Ledezma, R.M. (1991). Chemical Geothermometers Applied to the Study of Thermalized Aquifers in Guaymas, Sonora, México: A Case History. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 46, 49-59.

Radelli, Luigi (2005). Oligo-Miocene Evolution of Sonora-Baja California, México: A Segment of the North American Margin. *Boletín del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, Segunda Época*, volúmenes 18 y 19, Número 1, octubre del 2005.

Ramírez Díaz, Laura Lizette (2005). Peligro Sísmico en la Región Sur del Estado de Sonora. Tesis de Licenciatura, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, marzo del 2005, Hermosillo, Sonora.

Ramírez Miguel, Nely (2010). Caracterización de Fallas y Fracturas Mediante Tomografía Eléctrica Utilizando Electrodo de Acoplamiento Capacitivo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Profesional, México, D.F., 2010.

Raucoules, Daniel, Le Cozannet, Gonéri, Wöppelman, Guy, de Michele, Marcelo, Gravelle, Médéric, Daag, Arturo, and Marcos, Marta (2013). High Nonlinear Urban Ground Motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 Observed by DInSAR: Implications for Sea Level Measurement. *Remote Sensing of Environment, Journal*, 139 (2013), 386-397, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.021>.

Reyes Loáisiga¹, Norwin, Sarria Sirias², Aiser y Maltez Montiel³, Julio (s/f). Metodología para la Determinación de la Vulnerabilidad Sísmica en Edificaciones. Proyecto de Investigación; UNI-

SAREC; ^{1,2}Investigador, Universidad Nacional de Ingeniería (FTC); ³Tutor, Decano FTC, Universidad Nacional de Ingeniería; Managua, Nicaragua.

Rodríguez, C. (2006). La Subsistencia Regional y Agrietamiento del Subsuelo en San Luis Potosí por la Sobreexplotación de los Acuíferos. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: Especial de Geología Urbana, LVIII (2), pp. 265-269.

Rodríguez Castillo, Ramiro y Rodríguez Velázquez, Isaías (2006). Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsistencia. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, Núm. 2, p. 265-269; Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Rodríguez, M. y Castellón, E. (1995). Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estructural de Edificaciones. Informe No. 569, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 84 pp.

Rojas, Eduardo¹, Arzate, Jorge A.², Arroyo, Moisés, and Yutsis, Psevolod¹⁻³ (?). Soil Cracking Due to Water Withdrawal. Geología y Geofísica Ambiental, GGA-19; ¹Posgrado en Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro; ²UNICIT, UNAM; ³Moscow State University, Department of Geology, Russia.

Rojas, E., Arzate, J., and Arroyo, M. (2002). A Method to Predict the Group Fissuring and Faulting Causes by Regional Groundwater Decline. Engineering Geology, no. 65, p. 245-260.

Roldán Quintana, Jaime (2002). Caracterización Geológico-Geoquímica y Evolución del Arco Magmático Mesozoico-Terciario entre San Carlos y Maycoba, Sur de Sonora. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 185 p.

Roldán Quintana, Jaime¹, Mora Klepeis, Gabriela², Calmus, Thierry¹, Valencia Moreno, Martín¹ y Lozano Santacruz, Rufino³ (2004). El Graben de Empalme, Sonora, México: Magmatismo y Tectónica Extensional Asociados a la Ruptura Inicial del Golfo de California. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, 2004, p. 320-334. ¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, Apartado Postal 1039, 83000 Hermosillo, Sonora, México; Geology Department, The University of Vermont,

Burlington, VT, 05405, EE.UU.; ³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D.F.

Rowland, Stephen M., Duebendorfer, Ernest M., and Schiefelbein, Ilsa M. (2007). *Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology*. Blackwell Publishing Ltd, Australia.

Roy, A. and Apparao, A. (1971). Depth of Investigation in Direct Current Methods. *Geophysics*, October 1971, p. 943-959, doi: [10.1190/1.1440296](https://doi.org/10.1190/1.1440296).

Safina, S. (2003). *Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones Esenciales. Análisis de su Distribución al Riesgo Sísmico*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Sánchez San Román, F. Javier (?). *Prospección Geofísica: Soneos Eléctricos Verticales*. Dpto. Geología, Universidad Salamanca, España, <http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Sasaki, Y. (1992). Resolution of Resistivity Tomography Inferred from Numerical Simulation. *Geophysical Prospecting*, v. 40, p. 453-464.

Servicio Geológico Mexicano (SGM; 2000). *Carta Geológico-Minera Sierra Libre, H12-11, Escala 1:250,000*.

Servicio Geológico Mexicano (SGM; 2002). *Carta Geológico-Minera Guaymas, G12-2, Escala 1:250,000*.

Servicio Geológico Mexicano (SGM; 2017). *Escala de los Sismos*.

Siles, Gabriela LI., Alcérreca Huerta, Juan Carlos, López Quiroz, Penélope, and Carrera Hernández, Jaime (2015). On the Potential of Time Series InSAR for Subsidence and Ground Rupture Evaluation: Application to Texcoco and Cuautitlán-Pachuca Subbasins, Northern Valley of México. *Nat. Hazards* (2015), 79: 1091-1110, doi: [10.1007/s11069-015-1894-4](https://doi.org/10.1007/s11069-015-1894-4).

Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres (SINAPRED; 2005). *Reporte sobre las Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos ante Inundaciones, Deslizamientos*,

Actividad Volcánica y Sismos. Secretaría Ejecutiva, Departamento Chinandega, Municipio Corinto, República de Nicaragua.

Smith, N.C. and Vozoff, K. (1984). Two-Dimensional DC Resistivity Inversion for Dipole-Dipole. Data IEEE Trns. Geosci. Remote Sensing, 22, 21-28.

Somerville, P.G. (2000). Magnitud Scaling of Near-Fault Ground Motion. Proceedings Intentional Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake, Volume 1, 59-70.

Spencer, J.E. and Reynolds, S.J. (1989). Middle Tertiary Tectonics of Arizona and Adjacent Areas. In Jenney, J.P. and Reynolds, S.J., eds.; Geologic Evolution of Arizona; Tucson; Arizona Geol. Society Digest 17, p. 539-573.

Stewart, J. (1971). Basin and Range Structure: A System of Horsts and Grabens Produced by Depp-Seated Extension. Geological Society of America Bull., v. 82, p. 1019-1044.

Stewart, J.H. and Roldán Quintana, J. (1994). Map Showing Late Cenozoic Extensional Tilt Patterns and Associated Structures in Sonora and Adjacent Areas, México: 1:1'000,000. U.S. Geological Survey, Miscellaneous Field Studies Map MF-2238, with text included.

Stock, J.M. (2000). Relation of the Puertecitos Volcanic Province, Baja California, Mexico, to Development of the Plate Boundary in the Gulf of California. En Delgado-Granados, H., Aguire-Díaz, G., Stock, J.M., eds.; Cenozoic Tectonics and Volcanismo of Mexico; Boulder, Colorado, Geologic Society of America, Special Paper 334, 143-156.

Stock, J.M. and Hodges, K.V. (1989). Pre-Pliocene Extnsion Around the Gulf of California and the Transfer of Baja California to the Pacific Plate. Tectonics, 8, 99-115.

Stock, J.M. and Hodges, K.V. (1990). Miocene to Recent Structural Development of an Extensional Accommodation Zone, Northeastern Baja California, México. Journal of Structural Geology, 12, 315-328.

- Stock, J.M., Lewis, C.J., and Nagy, E.A. (1999). The Tuff of San Felipe: An Extensive Middle Miocene Pyroclastic Flow Deposit in Baja California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93, 53-74.
- Summer, J.S. (1976). *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, U.S.A., 278 pp.
- Tejero, A., Chávez, R.E., Urbieto, J., and Flores Márquez, E.L. (2002). Cavity Detection in the Southwestern Hilly Portion of México City by Resistivity Imaging. *Journal Environmental Engineering Geophysics*, vol. 7, 130.
- Telford, W., Geldard, L., Sheriff, E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 760 p.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics (Second Edition)*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 790 pp.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys, D.S. (1990). *Applied Geophysics. Second Edition*.
- Terra, Tecnología del Subsuelo (2009). Informe del Estudio Geoeléctrico Efectuado en el Predio Ubicado en el Municipio de Jesús María, en un Predio Denominado "El Chichimeco", cerca de la Comunidad de San Antonio de los Horcones, Ags. Aguascalientes, Ags., mayo del 2009.
- Tosi, Luigi, Da Lio, Cristina, Strozzi, Tazio, and Teatini, Prieto (2016). Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. *Remote Sens.*, 2016, 8, 308; doi: [10.3390/rs8040308](https://doi.org/10.3390/rs8040308).
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G. (1975). A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 3, pp. 581-626, June 1975.

- Tripp, A.C., Hohman, G.W., and Swift, C.M. (1984). Two Dimensional Resistivity Inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.
- Trujillo Candelaria, Jorge Antonio (2009). Fallamiento de Terrenos por Sobreexplotación de Acuíferos en Celaya, Guanajuato. *Aquaforum*, Año 13, No. 52, págs. 1-4.
- Urbietta Gómez, J. (2009). Evaluación de las Técnicas de Adquisición de Datos 2D y 3D con Tomografía de Resistividad Eléctrica en Pozo. Tesis de Maestría, Posgrado, UNAM.
- Valencia Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M.D., Patchett, P.J., Zürcher, L., Hodkinson, D., and Roldán Quintana, J. (2001). A Chemical and Isotopic Study of the Laramide Granitic Belt of Northwestern México: Identification of the Southern Edge of the North American Precambrian Basement. *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1409-1422.
- Vargas C., G. (1999). Guía Técnica para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza por Movimientos en Masa. Villavicencio, Meta (Col.), Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Proyecto Río Guatiquía.
- Vega, G.R. (1996). La Sierra de Mazatán, Sonora, México: Geología y Análisis Estructural de un Complejo Metamórfico en la Parte Sur de la Provincia de *Basin and Range*. Tesis de Maestría; Universidad de Sonora.
- Vega Granillo, L., Castillo Gurrola, J., Morales Montaña, M. y Tapia Padilla, G. (2002). Hidrogeofísica y Balance Hidrológico para la Modelación Matemática del Acuífero de Guaymas-Empalme, Sonora. (Resumen), *in* III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Puerto Vallarta, Jalisco, México, *Geos*, 22 (2), 122-123.
- Vega Granillo, R. and Calmus, T. (2003). Mazatán Metamorphic Core Complex (Sonora, México): Structures Along the Detachment Fault and its Exhumation Evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 193-204.
- Vega Granillo, R., De la O, M., Vega Granillo, L. y Araux Sánchez, E. (2004). Geología Urbana y Riesgos Geológicos de la Región de Guaymas y San Carlos, Sonora. Colección Textos Académicos No. 33, Universidad de Sonora, Editorial Unison 2004.
-

- Vidal-Solano, J.R. (2005). Le Volcanisme Hyperalcalin d'Age Miocene Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora). *Minéralogie, Géochimie, Cadre Géodynamique*; Francia, Universidad Paul Cézanne, Tesis de Doctorado, 256 pp.
- Waltham, Tony, Bell, Fred, and Culshaw, Martin (2005). *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2005.
- Ward, Stanley H. (1990). *Resistivity and Induced Polarization Methods*. *Geotechnical and Environmental Geophysics*: pp. 147-190, <http://doi.org/10.1190/1.9781560802785.ch6>.
- White, Kevin and El Asmar, Hesham M. (1999). Monitoring Changing Position of Coastlines Using Thematic Mapper Imagery, an Example from the Nile Delta. (*Journal of Geomorphology*, 29, 93-105.
- Wilson, R.T. (1978). *Reconnaissance Geology and Petrology of the San Carlos Area, Sonora, México*. Tempe Arizona, Arizona State University, M.Sc. thesis, 107 p.
- Wong, M.S. and Gans, P. (2003). Tectonic Implications of Early Miocene Extensional Unroofing of the Sierra Mazatán Metamorphic Core Complex, Sonora, México. *Geology*, 31, 953-956.
- Worden, C.B., Gerstenberger, D.A., Rhoades, D.J., and Wald (2012). Probabilistic Relationships between Ground Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bull. Soc. Am.* 102(1), 204-221, DOI: 10.1785/0120110156.
- Yongbin, Quan, Fang, Hao, Jianzhang, Liu, Dijiang, Zhao, Jingiang, Tian, and Zhenfeng, Wang (2016). Source Rock Deposition Controlled by Tectonic Subsidence and Climate in the Western Pearl River Mouth Basin, China: Evidence from Organic and Inorganic Geochemistry. *Marine and Petroleum Geology, Journal*, 79 (2017), 1-17, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.10.028>.
- Yu Qun, Xue, Yun, Zhang, Shu Jun, Ye, Ji Chun, Wu, and Qin Fen, Li (2005). Land Subsidence in China. *Environ. Geol.* (2005), 48: 713-720, doi: [10.1007/s00254-005-0010-6](http://dx.doi.org/10.1007/s00254-005-0010-6).

Zeitoun, David G. and Wakshal, Eliyahu (2013). Land Subsidence Analysis in Urban Areas: The Bangkok Metropolitan Area Case Study. Springer Environmental Science and Engineering, doi: [10.1007/978-94-007-5506-2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5506-2).

Zohdy, A.A.R. (1989). A New Method for Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding Curves. Geophysics, 54, 245-253.

11.1. Cibergrafía

<http://earthjay.com/?p=6962>

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvin_eji/productos/historicos/2104/702825223328/702825223328_3.pdf

http://ordenamientoterritorial.gob.mx/SEIOT/DPT/PDUCP/empalme/DOCUMENTO/250001_1_Antecedentes.pdf

<http://prodigy.msn.com/es-mx/video/watch/se-hunden-200-metros-de-carretera-en-florenia/vi-BBttBBe?ocid=VMSNNMX7>

http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_001748.pdf

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19217/Capitulo3.pdf>

<http://www.24-horas.mx/se-abre-la-tierra-en-japon-hundimiento-supera-los-300-metros-cuadrados-fotos/>

<http://www.fm105.com.mx/noticias/local/notalocal.php?dID=665725650>

<http://www.lne.es/multimedia/videos/sociedad/2016-05-25-102648-socavon-metros-florenia.html>

<http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/>

<https://actualidad.rt.com/actualidad/183008-china-estacion-metro>

<https://es.slideshare.net/DavidNjar/subsistencias-y-colapsos>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Empalme>

https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismol%C3%B3gica_de_magnitud_de_momento

https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismol%C3%B3gica_de_Mercalli

https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_sismol%C3%B3gica_de_Richter

<https://meganoticias.mx/tu-ciudad/guaymas/ultimo-minuto/item/78490-se-hunden-calles-de-empalme.html>

<https://www.colsan.edu.mx/investigacion/pays/archivo/Julioetal2012.pdf>

https://www.google.com.mx/imgres?imgurl=http://3.bp.blogspot.com/-4TusswJ0ALQ/TodfNQaRUFI/AAAAAAAAAEvU/KnECi1HpiNo/s1600/cperm.gif&imgrefurl=http://cienciageografica.carpetapedagogica.com/2011/09/escala-richter-y-escala-mercalli.html&h=336&w=608&tbnid=zYUGanWIT3TwpM:&q=escala+de+mercalli+y+richter&tbnh=116&tbnw=210&usq=__VZMCjh1LzBQedDjES-gRmCOwk3o%3D&vet=10ahUKEwjuondiqHcAhUFQK0KHatvDUEQ9QEILDAA..i&docid=xBv-R6ZM_XVgZM&sa=X&ved=0ahUKEwjuondiqHcAhUFQK0KHatvDUEQ9QEILDAA#h=336&imgdii=zYUGanWIT3TwpM:&tbnh=116&tbnw=210&vet=10ahUKEwjuondiqHcAhUFQK0KHatvDUEQ9QEILDAA..i&w=608

https://www.google.com.mx/search?q=ert+collapse+resistivity&bih=677&biw=1366&espv=2&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjQ1eqg07vNAhVq64MKHeAbAnIQ_AUICSgC#tbm=isch&tbs=rimg%3ACUjyKNMhG2Rcljh5I9kyWseloQkSUZHRanPscX_1tITP_1jMCufHT84wbsZ2_0JhbK84wZb40YanIWnXCfQUBQ1JVLxVioSCXmX2TJax4ihEREYqh7AQm7EKhIJCRJRkdFqc-wR7Jr6bqGZFaQqEglxf-0hM_1-MwBEiCjRB2SXLsCoSCa58dPzjBuxnERMhVjT0-oo8KhIjBqMfsrczjBlSR8Y5bvs5mJJwqEgnjRhqeVadcJxFgiiLtiPI8aSoSCeBQFDUIUvFWES7wqgyDQR3p&q=ert%20collapse%20resistivity&imgsrc=eZfZMlrHiKFzwM%3A

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

<https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/relieve-de-mexico/provincia-llanura-costera-del-pacifico.html>

<https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/relieve-de-mexico/provincia-llanura-sonorense.html>

https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html

<https://www.youtube.com/watch?v=kS3urYWY9WI>

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6230/03CAPITULO2.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Relación entre las escalas de Richter, Magnitud del Momento y Mercalli (modificada del Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Grado o Magnitud	Escala de Richter	Magnitud del Momento	Grado	Escala de Mercalli
Menos de 2.0	Micro. Los microsismos no son perceptibles; alrededor de 8,000 por día		I	Muy débil. Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
2.0 - 2.9	Menor. Generalmente no son perceptibles, pero son registrados en los sismógrafos; alrededor de 1,000 por día		II	Débil. Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios; los objetos suspendidos pueden oscilar.
3.0 - 3.9	Menor. Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños; 49,000 por año		III	Leve. Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios; muchas personas no lo asocian con un temblor; los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente; vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable.
4.0 - 4.9	Ligero. Movimiento de objetos en las habitaciones que genera ruido; sismo significativo, pero con daño poco probable; 6,200 por año		IV	Moderado. Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior; por la noche, algunas despiertan; vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen; sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio o al paso del mismo; los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Continuación Anexo 1. Relación entre las escalas de Richter, Magnitud del Momento y Mercalli (modificada del Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Grado o Magnitud	Escala de Richter	Magnitud del Momento	Grado	Escala de Mercalli
5.0 - 5.4	Moderado. A menudo se siente, pero sólo causa daños menores		V	Poco fuerte. Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan; algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables; se observan perturbaciones (oscilaciones) en los árboles, postes y otros objetos altos; se detienen relojes de péndulo.
5.5 - 5.9	Moderado. Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas; en edificaciones bien diseñadas, los daños son leves; 800 por año		VI	Fuerte. Sacudida sentida por todo el mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera; algunos muebles pesados cambian de sitio y provocan daños leves, en especial en viviendas de material ligero; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas; daños ligeros.
			VII	Muy fuerte. Ponerse de pie es difícil; muebles dañados; advertido por todos; la gente huye al exterior; daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción; daños ligeros a moderados en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; ruptura de algunas chimeneas y mampostería; perceptible por las personas conduciendo vehículos en movimiento.

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Continuación Anexo 1. Relación entre las escalas de Richter, Magnitud del Momento y Mercalli (modificada del Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Grado o Magnitud	Escala de Richter	Magnitud del Momento	Grado	Escala de Mercalli
6.0 - 6.9	Fuerte. Puede ocasionar daños severos en áreas donde vive mucha gente, llegándolas a destruir, en hasta unos 160 kilómetros a la redonda; 120 por año		VIII	Destructivo. Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno, considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial, grande en estructuras débilmente construidas; los muros salen de sus armaduras; caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros; mampostería seriamente dañada o destruida; los muebles pesados se vuelcan; arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades; cambio en el nivel del agua de los pozos; pérdida de control en las personas que guían carros de motor.
			IX	Muy destructivo. Pánico generalizado; daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial; los edificios salen de sus cimientos; el terreno se agrieta notablemente; las tuberías subterráneas se rompen.
7.0 - 7.9		Terremoto mayor ; puede causar graves daños en extensas zonas; 18 por año	X	Desastroso. Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno; las vías del ferrocarril se tuercen; considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes; invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Continuación Anexo 1. Relación entre las escalas de Richter, Magnitud del Momento y Mercalli (modificada del Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Grado o Magnitud	Escala de Richter	Magnitud del Momento	Grado	Escala de Mercalli
8.0 - 8.9		Cataclismo. Gran terremoto; destrucción total a comunidades cercanas; 1-3 por año	XI	Muy desastroso. Casi nunca estructura de mampostería queda en pie; puentes destruidos; anchas grietas en el terreno; las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio; hundimientos y derrumbes en terreno suave; gran torsión de vías férreas.
9.0 - 9.9		Cataclismo. Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros; 1-2 en 20 años	XII	Catastrófico. Destrucción total con pocos supervivientes; ondas visibles sobre el terreno; perturbaciones de las cotas de nivel; algunos objetos lanzados en el aire hacia arriba, otros se mueven y voltean; los niveles y perspectivas quedan distorsionados; imposibilidad de mantenerse en pie.
10 o mayor		Legendario o apocalíptico. Nunca registrado; en la historia de la humanidad (y desde luego que se tienen registros históricos de los sismos) nunca ha sucedido un sismo de esta magnitud		

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Anexo 2. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fallas normales).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
1	Falla normal	N 22° E	28	Falla normal inferida	N 30° E
2	Falla normal inferida	N 59° E	29	Falla normal	N 03° E
3	Falla normal inferida	N 28° E	30	Falla normal inferida	N 76° W
4	Falla normal	N 41° E	31	Falla normal inferida	N 53° E
5	Falla normal inferida	N 53° E	32	Falla normal inferida	N 42° W
6	Falla normal	N 23° E	33	Falla normal inferida	N 21° W
7	Falla normal	N 58° E	34	Falla normal inferida	N 19° E
8	Falla normal inferida	N 50° E	35	Falla normal inferida	N 13° E
9	Falla normal	N 56° E	36	Falla normal inferida	N 13° W
10	Falla normal inferida	N 51° E	37	Falla normal inferida	N 25° E
11	Falla normal inferida	N 50° W	38	Falla normal inferida	N 25° W
12	Falla normal inferida	N 04° W	39	Falla normal inferida	N 20° E
13	Falla normal	N 25° E	40	Falla normal inferida	N 65° E
14	Falla normal inferida	N 26° E	41	Falla normal inferida	N 67° E
15	Falla normal inferida	N 05° W	42	Falla normal	N 12° E
16	Falla normal inferida	N 61° W	43	Falla normal inferida	N 48° E
17	Falla normal inferida	N 33° E	44	Falla normal inferida	N 62° W
18	Falla normal inferida	N 64° E	45	Falla normal inferida	N 70° E
19	Falla normal inferida	N 42° E	46	Falla normal inferida	N 68° E
20	Falla normal inferida	N 39° W	47	Falla normal inferida	N 45° E
21	Falla normal inferida	N 74° W	48	Falla normal inferida	N 22° E
22	Falla normal inferida	N 65° W	49	Falla normal inferida	N 10° E
23	Falla normal inferida	N 62° E	50	Falla normal inferida	N 32° E
24	Falla normal	N 71° E	51	Falla normal inferida	N 41° E
25	Falla normal	N 40° E	52	Falla normal	N 14° E
26	Falla normal inferida	N 41° E	53	Falla normal	N 40° E
27	Falla normal inferida	N 27° E	54	Falla normal	N 07° E

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Continuación Anexo 2. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fallas normales).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
55	Falla normal inferida	N 53° W	67	Falla normal inferida	N 12° W
56	Falla normal	N 33° E	68	Falla normal	N 35° E
57	Falla normal inferida	N 29° W	69	Falla normal	N 49° E
58	Falla normal inferida	N 19° W	70	Falla normal	N 14° W
59	Falla normal	N 80° W	71	Falla normal inferida	N 43° W
60	Falla normal	N 73° W	72	Falla normal inferida	N 26° E
61	Falla normal	N 76° W	73	Falla normal	N 18° W
62	Falla normal	N 70° E	74	Falla normal	N 80° W
63	Falla normal inferida	N 16° E	75	Falla normal	N 40° E
64	Falla normal	N 33° E	76	Falla normal inferida	N 27° E
65	Falla normal inferida	N 51° E	77	Falla normal	N 35° E
66	Falla normal inferida	N 82° E	78	Falla normal inferida	N 53° E

Anexo 3. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fallas regionales/deslizamiento lateral).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
1	Falla regional	N 31° E	15	Falla regional	N 15° E
2	Falla regional	N 17° E	16	Falla regional	N 28° E
3	Falla regional	N 31° W	17	Falla regional	N 20° E
4	Falla regional	N 57° W	18	Falla regional	N 17° W
5	Falla regional	N 52° W	19	Falla regional	N 58° E
6	Falla regional	N 37° E	20	Falla regional	N 22° E
7	Falla regional	N 34° E	21	Falla regional	N 74° W
8	Falla regional	N 64° W	22	Falla regional	N 41° E
9	Falla regional	N 31° E	23	Falla regional	N 63° E
10	Falla regional	N 57° W	24	Falla regional	N 49° E
11	Falla regional	N 35° E	25	Falla regional	N 16° E
12	Falla regional	N 16° E	26	Falla regional	N 27° E
13	Falla regional	N 15° E	27	Falla regional	N 84° E
14	Falla regional	N 11° W	28	Falla regional	N 13° E

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Continuación Anexo 3. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fallas regionales/de deslizamiento lateral).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
29	Falla regional	N 76° W	59	Falla regional	N 63° E
30	Falla regional	N 25° E	60	Falla regional	N 15° W
31	Falla regional	N 23° W	61	Falla regional	N 77° E
32	Falla regional	N 4° E	62	Falla regional	N 25° W
33	Falla regional	N 15° E	63	Falla regional	N 66° E
34	Falla regional	N 28° E	64	Falla regional	N 71° W
35	Falla regional	N 82° W	65	Falla regional	N 26° E
36	Falla regional	N 82° W	66	Falla regional	N 85° W
37	Falla regional	N 17° E	67	Falla regional	N 09° E
38	Falla regional	N 76° W	68	Falla regional	N 71° W
39	Falla regional	N 80° E	69	Falla regional	N 56° E
40	Falla regional	N 08° W	70	Falla regional	N 13° E
41	Falla regional	N 64° W	71	Falla regional	N 04° E
42	Falla regional	N 14° W	72	Falla regional	N 80° W
43	Falla regional	N 57° W	73	Falla regional	N 28° E
44	Falla regional	N 26° E	74	Falla regional	N 36° E
45	Falla regional	N 62° E	75	Falla regional	N 21° W
46	Falla regional	N 16° W	76	Falla regional	N 17° E
47	Falla regional	N 55° W	77	Falla regional	N 22° E
48	Falla regional	N 17° W	78	Falla regional	N 26° E
49	Falla regional	N 25° E	79	Falla regional	N 35° E
50	Falla regional	N 61° E	80	Falla regional	N 35° W
51	Falla regional	N 56° E	81	Falla regional	N 41° E
52	Falla regional	N 72° E	82	Falla regional	N 40° E
53	Falla regional	N 77° W	83	Falla regional	N 67° E
54	Falla regional	N 45° W	84	Falla regional	N 25° W
55	Falla regional	N 75° E	85	Falla regional	N 53° E
56	Falla regional	N 21° W	86	Falla regional	N 16° W
57	Falla regional	N 51° E	87	Falla regional	N 38° E
58	Falla regional	N 64° E	88	Falla regional	N 34° W

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Anexo 4. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fracturas).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
1	Fractura	285	39	Fractura	65	77	Fractura	350
2	Fractura	304	40	Fractura	49	78	Fractura	38
3	Fractura	48	41	Fractura	299	79	Fractura	40
4	Fractura	55	42	Fractura	69	80	Fractura	305
5	Fractura	342	43	Fractura	316	81	Fractura	26
6	Fractura	299	44	Fractura	56	82	Fractura	25
7	Fractura	43	45	Fractura	64	83	Fractura	35
8	Fractura	81	46	Fractura	46	84	Fractura	42
9	Fractura	39	47	Fractura	75	85	Fractura	37
10	Fractura	345	48	Fractura	42	86	Fractura	30
11	Fractura	56	49	Fractura	66	87	Fractura	43
12	Fractura	71	50	Fractura	69	88	Fractura	20
13	Fractura	54	51	Fractura	328	89	Fractura	51
14	Fractura	69	52	Fractura	272	90	Fractura	62
15	Fractura	73	53	Fractura	294	91	Fractura	334
16	Fractura	73	54	Fractura	308	92	Fractura	19
17	Fractura	72	55	Fractura	340	93	Fractura	22
18	Fractura	46	56	Fractura	347	94	Fractura	32
19	Fractura	43	57	Fractura	6	95	Fractura	21
20	Fractura	27	58	Fractura	339	96	Fractura	34
21	Fractura	282	59	Fractura	19	97	Fractura	42
22	Fractura	46	60	Fractura	331	98	Fractura	34
23	Fractura	65	61	Fractura	29	99	Fractura	0
24	Fractura	81	62	Fractura	46	100	Fractura	33
25	Fractura	62	63	Fractura	38	101	Fractura	45
26	Fractura	46	64	Fractura	32	102	Fractura	26
27	Fractura	302	65	Fractura	333	103	Fractura	44
28	Fractura	287	66	Fractura	79	104	Fractura	65
29	Fractura	46	67	Fractura	35	105	Fractura	6
30	Fractura	289	68	Fractura	41	106	Fractura	357
31	Fractura	313	69	Fractura	32	107	Fractura	23
32	Fractura	312	70	Fractura	47	108	Fractura	28
33	Fractura	60	71	Fractura	331	109	Fractura	28
34	Fractura	51	72	Fractura	11	110	Fractura	19
35	Fractura	60	73	Fractura	41	111	Fractura	25
36	Fractura	75	74	Fractura	48	112	Fractura	51
37	Fractura	40	75	Fractura	40	113	Fractura	31
38	Fractura	66	76	Fractura	31	114	Fractura	29

Evaluación de la Susceptibilidad de Subsistencia en Empalme, Sonora

Universidad de Sonora

Departamento de Geología

Continuación Anexo 4. Tabla de rumbos preferenciales de lineaciones observadas y calculadas (fracturas).

Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo	Lineación	Estructura	Rumbo
115	Fractura	23	148	Fractura	335	181	Fractura	49
116	Fractura	44	149	Fractura	328	182	Fractura	354
117	Fractura	35	150	Fractura	301	183	Fractura	31
118	Fractura	51	151	Fractura	48	184	Fractura	21
119	Fractura	31	152	Fractura	39	185	Fractura	30
120	Fractura	16	153	Fractura	28	186	Fractura	38
121	Fractura	52	154	Fractura	35	187	Fractura	34
122	Fractura	57	155	Fractura	16	188	Fractura	32
123	Fractura	52	156	Fractura	50	189	Fractura	33
124	Fractura	72	157	Fractura	34	190	Fractura	349
125	Fractura	40	158	Fractura	57	191	Fractura	49
126	Fractura	34	159	Fractura	31	192	Fractura	50
127	Fractura	311	160	Fractura	298	193	Fractura	43
128	Fractura	17	161	Fractura	53	194	Fractura	36
129	Fractura	59	162	Fractura	338	195	Fractura	39
130	Fractura	24	163	Fractura	314	196	Fractura	50
131	Fractura	51	164	Fractura	297	197	Fractura	45
132	Fractura	300	165	Fractura	29	198	Fractura	31
133	Fractura	306	166	Fractura	32	199	Fractura	44
134	Fractura	308	167	Fractura	59	200	Fractura	52
135	Fractura	34	168	Fractura	49	201	Fractura	39
136	Fractura	317	169	Fractura	22	202	Fractura	49
137	Fractura	344	170	Fractura	31	203	Fractura	5
138	Fractura	29	171	Fractura	52	204	Fractura	27
139	Fractura	47	172	Fractura	40	205	Fractura	35
140	Fractura	314	173	Fractura	21	206	Fractura	52
141	Fractura	38	174	Fractura	307	207	Fractura	47
142	Fractura	25	175	Fractura	337	208	Fractura	10
143	Fractura	32	176	Fractura	58	209	Fractura	300
144	Fractura	31	177	Fractura	70	210	Fractura	313
145	Fractura	326	178	Fractura	61	211	Fractura	40
146	Fractura	42	179	Fractura	33	212	Fractura	22
147	Fractura	21	180	Fractura	43			