



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Identificación de fallas activas en la región
Sureste del estado de Guerrero**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

PRESENTA

Victor Hugo Vargas Espinosa

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María Teresa Ramírez Herrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA
COMITÉ DE TITULACIÓN

Designación de sinodales de Examen Profesional

A los señores profesores:

Presidente: **M.C. EMILIANO CAMPOS MADRIGAL**
Vocal: **DRA. MARIA TERESA RAMIREZ HERRERA**
Secretario: **ING. FERNANDO ROSIQUE NARANJO**
1er. Suplente: **M.C. BERNARDO IGNACIO GARCIA AMADOR**
2do. Suplente: **LIC. SERGIO ENRIQUE MACIAS MEDRANO**

Conforme a la encomienda que hace el Director de la Facultad a este Comité de Titulación para la integración de jurados, me permito informar a ustedes que han sido designados sinodales del Examen Profesional de: **VARGAS ESPINOSA VICTOR HUGO**, registrado con número de cuenta **308278499** en la carrera de **INGENIERÍA GEOLÓGICA**; quien ha concluido el desarrollo del tema que le fue autorizado.

Ruego a ustedes se sirvan revisar el trabajo adjunto y manifestar a la Dirección de la Facultad, si es el caso, la aceptación mediante la firma en el oficio FEX-2 en el plazo indicado a continuación.

Por indicaciones del Sr. Director, con el fin de asegurar el pronto cumplimiento de las disposiciones normativas correspondientes y de no afectar innecesariamente los tiempos de titulación, les ruego tomar en consideración que para lo anterior cuentan ustedes con un plazo máximo de **cinco días hábiles** contados a partir del momento en que ustedes **acusen recibo de esta notificación**. Si transcurrido este plazo el interesado no tuviera observaciones de su parte, se entendería que el trabajo ha sido aprobado, por lo que deberán **firmar el oficio de aceptación del trabajo escrito**.

Doy a ustedes las más cumplidas gracias por su atención y les reitero las seguridades de mi consideración más distinguida.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, Cd. Mx. a 12 de noviembre de 2019.
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

DR. ENRIQUE ALEJANDRO GONZÁLEZ TORRES

NOTA: Por instrucciones del Director, deberán entregarse juntos y al mismo tiempo, el presente oficio FEX-1 y su correspondiente oficio FEX-2.

FEX-1
LPR

Dedicatoria

*Para María Espinosa, Francisco Vargas
y Viridiana Vargas*

*“Para nosotros no existen fronteras, las únicas que nos importan son los límites de las
placas tectónicas”*

Ma. Teresa Ramírez H.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y mentoría de la Dra. María Teresa Ramírez Herrera, quien mediante los siguientes proyectos del Instituto de Geografía financió este trabajo de investigación:

1. CONACYT-SEP No. 284365
2. PAPIIT No. IN109117

A mis padres... por su inmenso cariño y apoyo que me han brindado. Además, agradezco los valores y enseñanzas que me dieron y que me han hecho la persona que soy hoy en día. Por eso y todo: ¡Muchas gracias!

A mi hermana... por su apoyo, amor y compañía a lo largo de tantos años.

A mi familia... por el soporte y amor que me han ofrecido; en especial y con mucho cariño a mis abuelitas *Elfe* e *Irene*.

A mis profesores... ya que sin sus enseñanzas y paciencia este logro no hubiera podido completarse.

A mis sinodales... por su tiempo y observaciones que ayudaron a enriquecer este trabajo. Por inspirarme a querer dar más.

A la Dra. Ma. Teresa Ramírez... quien no solo me guio para poder concluir satisfactoriamente este trabajo, sino que también creyó y confió en mí. Gracias por tan fabulosas experiencias académicas y de vida.

A mi amiga Irma Varela... por su amor y compañía, ¡Gracias!

A mis amigos... Fortino e Isaac, por convertirse en personas que quiero conservar toda la vida. A Dianita Franco, por llegar a ser alguien muy importante para mí en tan poco tiempo. A Slim, Rubén e Israel, por tantos momentos y experiencias compartidas. A Karen Rdz, por tan bonita amistad y excelente compañía en las brigadas de campo. A Eugenio Contreras, por su amistad, compañía y consejos. A Sandra, por su ayuda en el trabajo de campo, pero también por su amistad. A Jonas Schriegel, por motivarme a seguir en este camino del aprendizaje. A Luis Caudillo, por su amistad y apoyo incondicional. A JuanDa, por su sincera amistad y experiencias compartidas. A Jan Cerny y Naruse-sensei, por todo su conocimiento transmitido. A Juan Valenzuela, por sus enseñanzas y amistad.

Por último y no menos importante, a mi amada Universidad y Facultad, a quienes no solo debo mi formación académica, pues me dieron más allá de conocimientos y experiencias que me hacen desear ser un buen mexicano.

¡Muchas gracias!

Resumen

El estudio de la *Tectónica* y sus efectos ha tomado relevancia en las últimas décadas. Los procesos que involucran grandes liberaciones de energía (p. ej. sismos) como sucede en las zonas de subducción pueden llegar a tener consecuencias directas sobre la sociedad. Por lo anterior, es importante entender de que forma las fuerzas involucradas en la convergencia de las *Placas Tectónicas* afectan y modelan la superficie de la Tierra. El objetivo principal de este trabajo consiste en estudiar la deformación que sufre el relieve debido a la actividad tectónica en la zona de subducción del Pacífico mexicano y, más en específico, en la porción Sureste del estado de Guerrero.

Con el estudio de las formas del relieve y utilizando *Modelos digitales de elevación*, *imágenes satelitales*, mapas de la *red hidrográfica* y catálogos de sismicidad de la zona, se trazaron lineamientos con el objetivo de identificar probables fallas activas en la región. Para fines de este trabajo se priorizaron estructuras que pudieran ser fallas laterales y que además tuvieran una orientación preferentemente *Este-Oeste* o similar.

Posteriormente se realizó una *Verificación de Campo* donde se pudo corroborar la existencia tanto de estructuras con un movimiento dextral como sinistral. Sobre las fallas encontradas, se buscaron rasgos que sugirieran que éstas se encuentran activas. Si bien no se observó algún indicador que por sí solo corroborara lo anterior, en algunas estaciones se identificaron formas en el relieve con un buen grado de preservación como estructuras tipo Riedel Shear, estrías y valles alineados, lo cual puede sugerir que se trata de estructuras relativamente recientes. Además, es importante mencionar que del total de lineamientos marcados solo se visitó aproximadamente el 10% debido a la falta de acceso, por lo que se puede considerar que aún podrían existir más estructuras que deben ser descartadas o confirmadas como fallas activas.

Finalmente, se pretende que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación sean una pauta para el estudio de la deformación de la corteza terrestre mediante el análisis de estructuras de importancia como lo son las fallas corticales de grandes dimensiones en el *Antearco* de la *Zona de Subducción Mexicana* en el estado de Guerrero.

Contenido

Lista de figuras	X
Lista de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	4
1.3. Antecedentes	5
1.4. Ubicación de la zona de estudio	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Placas tectónicas y sus límites	9
2.2. Fallas	13
2.3. Comportamiento de fallas <i>strike-slip</i>	16
2.4. Sismología	19
2.5. Sismos	21
2.5.1. Deslizamientos lentos	23
2.6. Tectónica activa	24
3. Marco Geológico	25
3.1. Contexto regional	25
3.1.1. Ambiente tectónico	25
3.1.2. Terrenos tectonoestratigráficos	26
3.2. Contexto local	33
4. Metodología	37
4.1. Análisis de las formas de relieve	38
4.1.1. Modelo digital de elevación	38
4.1.2. Análisis de la red hidrográfica	41
4.1.3. Ortofotos e imágenes satelitales	42
4.2. Análisis de la actividad sísmica del área	43

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

4.3. Trabajo de Campo	44
5. Resultados	45
5.1. Lineamientos Identificados	45
5.2. Resultados de Campo	57
5.2.1. Estación La Intersección	59
5.2.2. Estación La Presa	66
5.2.3. Estación La Tercia	72
5.3. Actividad sísmica del área de estudio	76
Discusión y conclusiones	81
Referencias	83

Índice de figuras

1.1.	Límites tectónicos en México	3
1.2.	A. Falla lateral izquierda <i>La Venta</i> ; B. Enjambres sísmicos en las costas del Pacífico.	6
1.3.	Croquis de ubicación del área de estudio.	8
2.1.	Modelo de placas tectónicas “PB2002”	10
2.2.	Mapa de epicentros y tipos de límites entre placas.	12
2.3.	Tipos de esfuerzos	13
2.4.	Transpresión y transtensión en el <i>stepover</i> de una falla <i>strike-slip</i>	16
2.5.	Desarrollo de una falla <i>strike-slip</i>	17
2.6.	Esquema de falla <i>strike-slip</i>	18
2.7.	Hipocentro y epicentro en un sismo	19
2.8.	Ondas sísmicas de cuerpo y superficiales.	20
2.9.	Tipo de deslizamiento a través de un plano de falla en una zona de subducción.	22
3.1.	Sismicidad en las costas del Pacífico Mexicano	26
3.2.	Límites de terrenos tectonoestratigráficos propuestos por Sedlock et al. (1993).	28
3.3.	Esquema de las teorías sobre el origen del Terreno Guerrero	30
3.4.	Terrenos tectonoestratigráficos.	32
3.5.	Mapa geológico del área de estudio	36
4.1.	Metodología utilizada en el análisis del relieve.	38
4.2.	Mapa de sombras I	39
4.3.	Mapa de sombras II	40
4.4.	Mapa de sombras III	40
4.5.	Mapa de sombras IV	41
4.6.	Combinación de bandas en imágenes satelitales Landsat 8	42
4.7.	Ejemplo de Ortofoto utilizada para el análisis del relieve	43
5.1.	Red hidrográfica de la zona estudiada	46

5.2. Lineamientos sobre patrón de drenaje	46
5.3. Lineamientos sobre el mapa de sombras	47
5.4. Lineamientos trazados sobre los mapas de sombras y el patrón de drenaje	47
5.5. Análisis de relieve con mapa de sombras. Elaborada con ArcMap, 2019 .	48
5.6. Análisis de relieve con imágenes satelitales. Elaborada con Google Earth Pro (2019)	49
5.7. Evidencia: ríos desviados.	49
5.8. Evidencia: ríos lineales.	50
5.9. Evidencia: valles lineales.	50
5.10. Perfil de elevación del valle.	51
5.11. Evidencia: parteaguas desplazado.	51
5.12. Evidencia: vegetación alineada.	52
5.13. Lineamientos marcados en el mapa de sombras	53
5.14. Lineamientos vistos con imágenes satelitales	54
5.15. Lineamientos marcados sobre el mapa litológico del <i>Servicio Geológico Mexicano</i>	55
5.16. Lineamientos trazados (amarillos) vs lineamientos del <i>SGM</i> (datos estruc- turales en color negro).	56
5.17. Mapa general de verificación de campo.	58
5.18. Mapa de la estación “La Intersección”	60
5.19. Evidencia en estación La Intersección: A) Cauce del río B) y C) Indica- dores cinemáticos	61
5.20. Evidencia de estación La Intersección: falla lateral izquierda	62
5.21. Actitud de los planos de falla y estrías	63
5.22. Evidencia de estación La Intersección	64
5.23. Actitud del plano de falla y estrías	64
5.24. Intersección entre falla principal y secundaria	65
5.25. Mapa de la estación “La Presa”	67
5.26. Evidencia de estación La Presa: A) Cauce del río B) Indicadores tipo escalón con fibras de cristales C) Estructuras tipo Riedel shears.	68
5.27. Actitud del plano de falla y estrías	69
5.28. Actitud del plano de falla y estrías	70
5.29. Evidencia de estación La Presa: formas de relieve.	71
5.30. Mapa de la estación “La Tercia”	72
5.31. Litología de la estación La Tercia.	73
5.32. Falla lateral derecha	74
5.33. Evidencia de fallamiento de la estación La Tercia	75
5.34. Actitud del plano de falla y estrías	76
5.35. Mapa de eventos sísmicos (Fuente: SSN)	77
5.36. Mapa de eventos sísmicos (Fuente: USGS)	78
5.37. Epicentros cercanos a los lineamientos.	79

Índice de tablas

1.1. Coordenadas del polígono.	7
2.1. Tipos de fallas geológicas	14
2.2. Evidencias de fallamiento.	15
3.1. Cartas Geológico-mineras utilizadas	33
3.2. Mineralogía del área de estudio de acuerdo al <i>SGM</i>	35
4.1. Combinación de bandas, Landsat 8	42
5.1. Coordenadas de las estaciones de campo	57
5.2. Características de epicentro	79

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo deriva del proyecto de investigación que se realiza en el *Laboratorio de Tsunamis y Paleosismología* de la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía y que tiene por nombre “Del Ciclo Sísmico a la Deformación Tectónica de Largo Plazo en el Antearco de la Zona de Subducción Mexicana” (proyecto dirigido por la Dra. María Teresa Ramírez Herrera). Este trabajo de tesis se llevó a cabo en una región ubicada al Sureste del Estado de Guerrero, donde se pretende identificar o descartar la existencia de estructuras geológicas de importancia, en específico, de fallas asociadas al proceso de subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana.

En el *Capítulo 1* se discute la importancia de estudiar el comportamiento de la *Zona de Subducción Mexicana (ZSM)* y como es que el peligro sísmico de esta región nos lleva al desarrollo de este tipo de trabajos de investigación. Además, debido a la complejidad y particularidad con que la *Placa de Cocos* subduce por debajo de la *Placa Norteamericana* podemos esperar efectos sobre la corteza y el relieve que la constituye, tal es el caso de la ocurrencia de grandes fallas laterales como lo han reportado Gaidzik et al. (2016). Es por lo anterior que en el *Capítulo 2* se explican cuáles son las principales características de las fallas laterales y que evidencias en el relieve se esperarían encontrar asociadas a estas estructuras.

En el *Capítulo 3* se describe el marco geológico regional y local, lo cual es importante debido a que la región en que se llevó a cabo esta investigación se encuentra en una zona geológicamente compleja, pues como lo mencionó Campa (1983) México está constituido por diferentes segmentos rocosos (*Terrenos tectonoestratigráficos*) que pueden ser diferenciados entre sí por las rocas que lo contienen, el origen, la edad y otros rasgos tectónicos.

En el *Capítulo 4* se explica como mediante el análisis del patrón de drenaje, Modelos Digitales de Elevación (*MDE*), imágenes satelitales, catálogos de sismicidad y una verificación de campo se buscó la evidencia que sustentara la ocurrencia de fallas y, más en específico, de fallas laterales sinestrales.

Finalmente en el *Capítulo 5* se presentan los resultados obtenidos tanto del análisis del relieve con sensores remotos (principalmente) como de la visita a campo que se realizó, para posteriormente realizar la *Discusión* final de las evidencias recabadas a lo largo de todo este trabajo.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad es cada vez más común escuchar acerca de eventos naturales y su impacto en las sociedades como lo son las erupciones volcánicas, los temblores, las inundaciones, entre otros. Además, el rápido y en muchos de los casos el descontrolado crecimiento que han tenido los asentamientos humanos en los últimos años nos ha mostrado la importancia de estudiar y comprender la interacción entre el humano y su entorno natural, así como los riesgos a los que están propensas sus sociedades debido a las características y condiciones del ambiente en el que se desarrollan. En México el estudio de los sismos y el impacto que ellos han dejado en la sociedad ha ido tomando relevancia, pues eventos como el terremoto del 19 de Septiembre de 1985 con una magnitud de 8.1 o el ocurrido el mismo día pero 32 años después y con una magnitud 7.1 (Servicio Sismológico Nacional, 2019) nos han hecho ver la necesidad de estudiar y comprender la mecánica de los procesos que generan este tipo de eventos.

El territorio mexicano se encuentra sobre importantes límites tectónicos, lo cual genera una intensa actividad sísmica. De mayor relevancia por su actividad sísmica podemos mencionar la Zona de Subducción Mexicana (*ZSM*) frente a las costas del estado de Guerrero, donde la Placa de Cocos subduce bajo la Placa Norteamericana (ver Fig. 1.1).

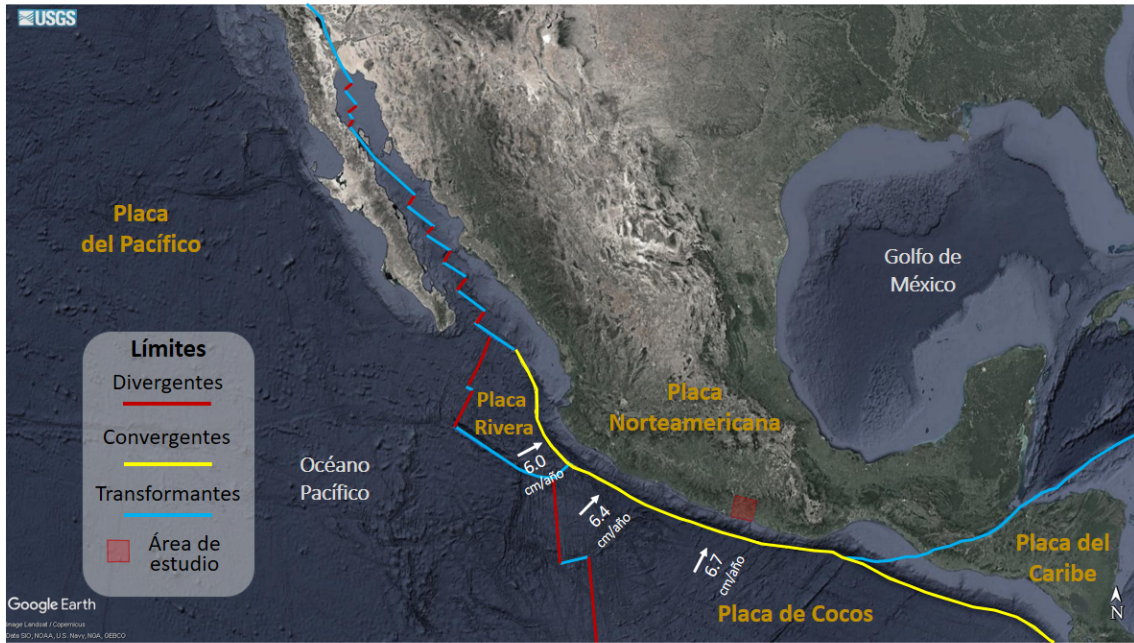


Figura 1.1: Límites tectónicos en México. Las flechas blancas indican la dirección y velocidad (cm/años) de convergencia (DeMets et al., 2010). Editado de *United States Geological Survey (USGS)* (2019). Elaborado con Google Earth Pro (2019).

Gaidzik et al. (2016) mencionan que, a excepción de la zona de costa y asociado a la zona de subducción mexicana, se carece de estudios de *fallas activas* y sus efectos en la morfología de esa zona en el estado de Guerrero. Además, los autores destacan la importancia de identificar las estructuras que tienen un alto potencial de reactivación bajo el ambiente de esfuerzos a los que actualmente se encuentran sometidas en esta porción del Pacífico Mexicano.

El principal objetivo de este trabajo de investigación es identificar anomalías en la morfología cortical y más en específico, identificar la existencia de fallas en la porción Sureste del estado de Guerrero, donde se pretende encontrar evidencia o rasgos que permitan corroborar o descartar la ocurrencia de *Tectónica activa*. En su trabajo, Gaidzik et al. (2016) reportaron la existencia de fallas laterales izquierdas en una porción de la zona conocida como la Brecha Sísmica de Guerrero, de aquí la importancia de identificar o descartar la presencia de este tipo de estructuras, así como de entender el comportamiento y las evidencias en el relieve que sugieren la presencia de este tipo de fallas.

1.2. **Objetivos**

Mediante el análisis del patrón de drenaje del área, rasgos geomorfológicos y con evidencia recabada en campo se pretende:

- I.* Identificar la presencia de fallas laterales en la región comprendida entre el Río Marquelia y el Río Papagayo en el estado de Guerrero.
- II.* Documentar rasgos o parámetros que sugieran que las estructuras encontradas tienen o no actividad tectónica en proceso (Tectónica activa).
- III.* Establecer o descartar una posible relación entre las estructuras de esta área con las documentadas en la Brecha de Guerrero (Gaidzik et al., 2016) y la actividad sísmica reportada en Oaxaca (Fasola et al., 2019).

1.3. Antecedentes

Ramírez Herrera et al. (2018) y Gaidzik et al. (2016) estudiaron la deformación de la corteza en la región del *antearco* ubicada entre la *Placa de Cocos* y la *Placa Norteamericana* (lo que se le conoce como la *Zona de Subducción Mexicana*) en el estado de Guerrero. Mediante el análisis del relieve y sus elementos estructurales, así como el análisis cinemático de las fallas pudieron evaluar el potencial sísmico de algunas de éstas.

Así mismo, sugieren que muchas de las fallas normales y laterales izquierdas que se encuentran casi paralelas a la zona de subducción se encuentran activas. Tal es el caso de la *Falla la Venta* que desvía la corriente del *Río Papagayo* cerca del poblado “La Venta” y que, de acuerdo con mediciones de GPS, presenta un desplazamiento de 4-5 mm/año (Ramírez Herrera et al., 2018), ver Fig. 1.2 A. El análisis realizado por Gaidzik et al. (2016) indica que la magnitud de un hipotético terremoto en esa falla podría llegar hasta 7.7, además de reportar (mediante los mecanismos focales de la zona) la existencia de un régimen de esfuerzos relevante capaz de reactivar las fallas laterales de la región. Los autores propusieron las siguientes dos teorías para explicar la actividad de las fallas estudiadas:

1. Las fallas en la zona tienen periodos de recurrencia muy largos (que van más allá de la existencia del registro instrumentado).
2. Estas estructuras experimentan episodios de deslizamientos lentos.

De igual forma realizaron el análisis de la topografía con el objetivo de encontrar evidencia en el relieve que pudiera sugerir la existencia de deformación asociado a efectos de *Tectónica activa* a lo largo de la zona de subducción Mexicana (Ramírez Herrera et al., 2018). Mediante información recabada en campo y la aplicación de algunos *Índices geomorfológicos* pudieron identificar variaciones considerables en el relieve y que asocian a procesos tectónicos actuales (Gaidzik y Ramírez Herrera, 2017).

Por otro lado, Fasola et al. (2019) documentaron la existencia de enjambres sísmicos de magnitudes menores a 5 en las costas de *Oaxaca* (cerca del límite norte del *Terreno Xolapa*) que ocurrieron entre 2006 y 2012, ver Fig. 1.2 B. Además, mediante mediciones realizadas con *GPS* identificaron la existencia de deslizamientos lentos (*slow slip events-SSEs*). Ellos proponen que estos eventos ocurren sobre el límite norte del complejo *Xolapa*, y cuya actividad está asociada a la forma en que la *Placa de Cocos* subduce bajo la *Placa Norteamericana*; donde la primera converge oblicuamente a la segunda con dos componentes en su vector de movimiento: uno perpendicular a la trinchera y otro paralelo a la misma.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

Cerca de las costas de Oaxaca y a profundidades someras, Arzate-Flores et al. (2016) y Jödicke et al. (2006) reportaron una zona con alta conductividad eléctrica, lo cual sugiere la presencia de fluidos en dicha área. Fasola et al. (2019) sugieren que los eventos de deslizamiento lento y los enjambres sísmicos podrían estar asociados a esa presencia de fluidos que se liberan de la placa subducida y que buscan migrar hacia la superficie a través de la zona de falla. Los enjambres sísmicos que presentaron Fasola et al. (2019) y que se ubican paralelos a la trinchera, caen cerca del límite norte del Terreno Xolapa donde, como se verá en capítulos posteriores, se ha propuesto que está conformado por una falla conocida como *Falla La Venta* (Gaidzik et al., 2016). Los recientes enjambres ahí identificados sugieren que estas estructuras podrían estar activas y/o presentando movimientos de deslizamiento lento.

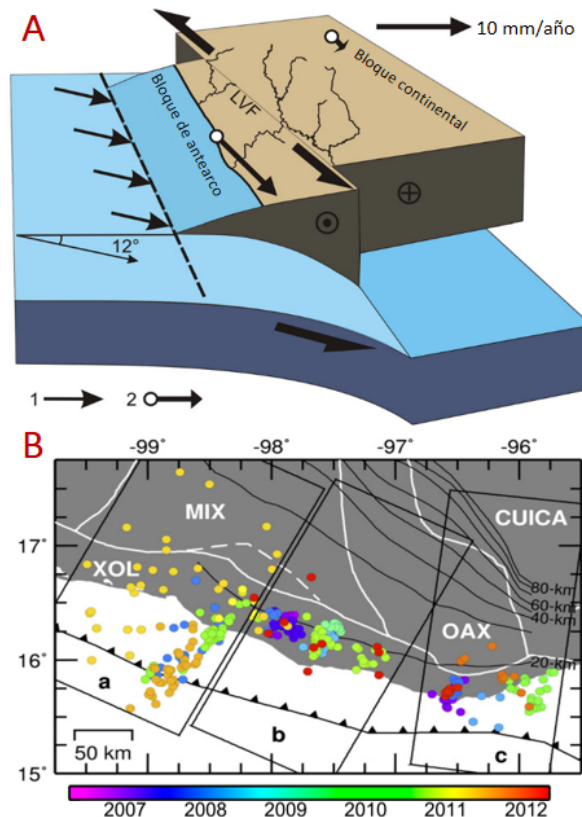


Figura 1.2: A. Falla lateral izquierda *La Venta* (LVF) y bloque de antearco generado por la subducción oblicua (con 12°) de la Placa de Cocos. Las flechas “1” indican la dirección de convergencia y las “2” el vector de movimiento medido con GPS. Tomada de (Gaidzik et al., 2016) ; B. Enjambres sísmicos (coloreados según el año en que ocurrieron) sobre la costa del Pacífico divididos por ubicación (rectángulos). Con líneas blancas se señalan los límites entre los terrenos tectonoestratigráficos (Campa, 1983) y con negro la profundidad de la placa. Tomada de Fasola et al. (2019).

Por otro lado, la falla conocida como *La Venta* es una estructura descrita por Gaidzik et al. (2016) y difiere con la interpretación que Tolson (2007) y Solari et al. (2007) reportaron en lo que denominaron como *La Falla Chacalapa-La Venta*. Ambas estructuras son parte del límite norte del terreno tectonoestratigráfico *Xolapa*, sin embargo de acuerdo a Tolson (2007) y Solari et al. (2007) la falla *Chacalapa-La Venta* se mantuvo activa en su porción Oeste durante el *Eoceno* y hasta el *Oligoceno* en la parte Este, mientras que la estructura definida por Gaidzik et al. (2016) ha presentado episodios de deslizamientos lentos en la actualidad.

1.4. Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra en la parte sureste del estado de Guerrero y está delimitada al norte por los municipios de *Chilpancingo de los Bravo*, *Mochitlán*, *Quechultenango*, *Acatepec*, *Zapotitlán Tablas*, *Tlacoapa*, *Malinaltepec* e *Iliatenco*; al sur se encuentra la línea de costa en el Océano Pacífico, al este está el Río Marquelia y al oeste el Río Papagayo (ver Fig. 1.3). La zona es un polígono con un área aproximada de $8,500 \text{ km}^2$ y que tiene las siguientes coordenadas:

Coordenadas del área de estudio		
Punto	Latitud	Longitud
1	17°28'37" N	99°33'02" O
2	17°18'25" N	98°36'36" O
3	16°42'10" N	99°40'55" O
4	16°32'48" N	98°45'58" O

Tabla 1.1: Coordenadas del polígono.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

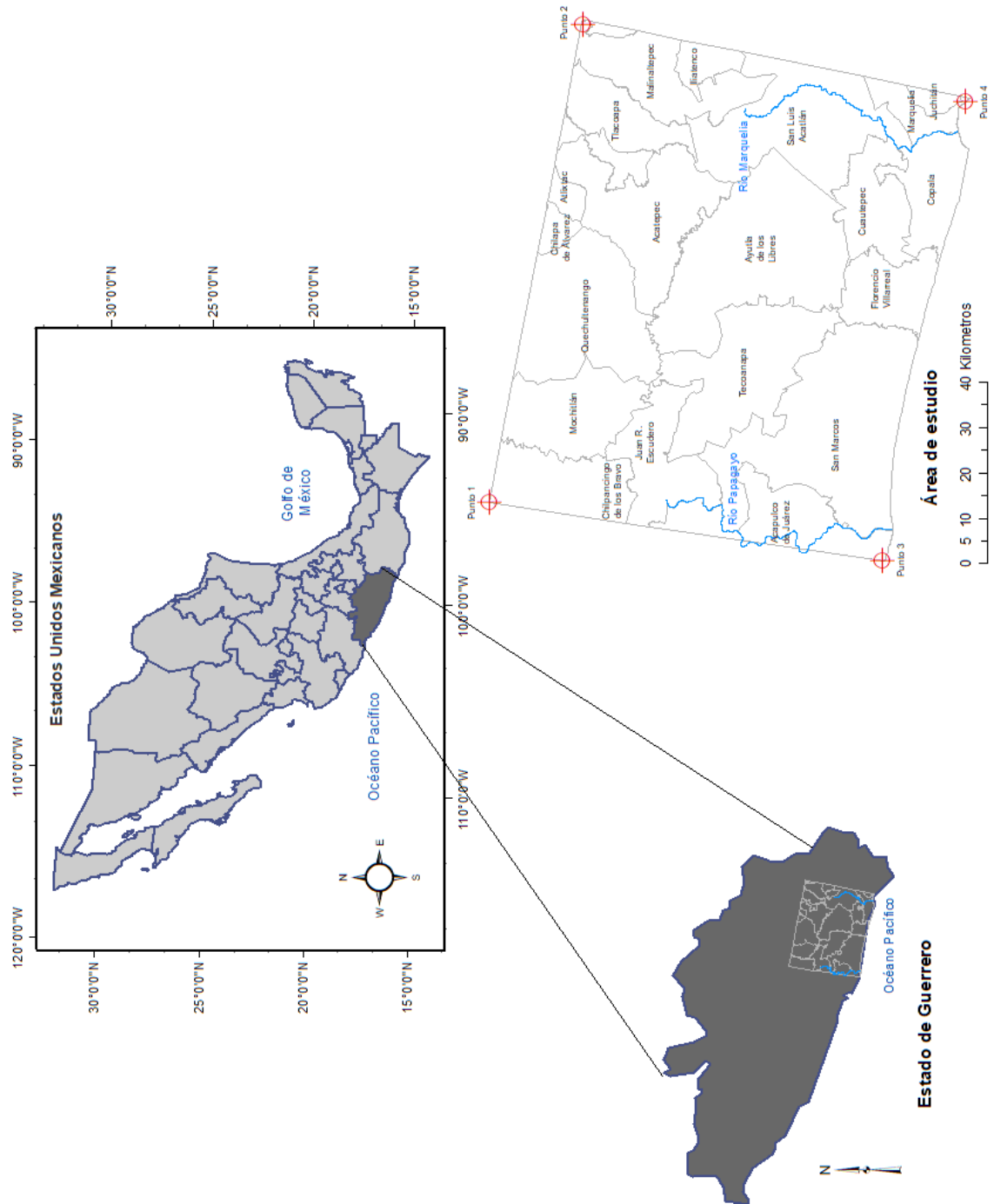


Figura 1.3: Croquis de ubicación del área de estudio. En el mapa se señala la división política de nuestra área, así como los límites laterales que corresponden a los ríos Papagayo y Marquelia. Elaborado con ArcMap (2019).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Placas tectónicas y sus límites

El estudio y modelado de la Tectónica de Placas tiene un amplio campo de aplicación, pues nos permite comprender muchos otros fenómenos como lo son el riesgo sísmico o por volcanes, ayuda a entender la génesis de algunos depósitos minerales o sobre el almacenamiento de otros recursos naturales. Además, muchas de las formas que podemos observar en el relieve son el resultado de procesos tectónicos en donde intervienen fuerzas asociadas al dinamismo interno de nuestro planeta. *La Teoría de la Tectónica de Placas* es un paradigma relativamente reciente que tiene alrededor de 50 años de aceptación y que explica el movimiento de la capa más externa de la Tierra que conocemos como “*Litósfera*”, donde (en comparación con el material más profundo que constituye a la Tierra) encontraremos cuerpos rocosos con un comportamiento más frágil y rígido (Keller y Pinter, 1996). La Litósfera es un cuerpo rocoso no continuo, es decir, está fracturada en una gran cantidad de partes de diversos tamaños y formas que se les conoce como *placas litosféricas* y que tienen un movimiento relativo entre ellas (Keller y Pinter, 1996). A continuación se describen los 3 límites de placas que existen:

- 1. Límites Divergentes:** en este tipo de márgenes dos placas se alejan una con respecto a otra. Se les conoce también como límites constructivos debido a que en ellos se va generando nueva corteza oceánica mientras se solidifica el material fundido que es expulsado a través de los Rifts continentales o de las dorsales oceánicas.
- 2. Límites Convergentes:** conocidos también como límites destructivos, se caracterizan por ser una zona donde las placas convergen. Si en este proceso interactúa una Corteza Oceánica (CO) con una Corteza Continental (CC), donde ésta última tiene una densidad promedio menor que la CO, se generará una zona de subducción donde la Corteza Oceánica se introduce por bajo la Corteza Continental. El proceso anterior propicia que se generen los arcos volcánicos sobre la porción superior de

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

la placa. Por otro lado, si placas con composiciones y características similares se encuentran (como una CC con otra CC) será más difícil que ocurra el procesos de subducción por lo que los bloques rocoso colisionan amalgamándose entre ellos (lo cual resulta en la formación de grandes cadenas montañosas). Existen situaciones donde una CO colisiona con otra CO, la de mayor densidad subducirá debajo de la menor y formará lo que se conoce como trincheras oceánicas y por lo tanto, se generarán arcos de islas.

- 3. Límites Transformantes:** en este caso el movimiento relativo entre las placas que interactúan es paralelo al plano de contacto y al no tener actividad de construcción o destrucción de masas rocosas se le conoce como límite conservativo.

El modelo de placas “PB2002” de Bird (2003) es uno de los más recientes y en el se propone la existencia de 14 grandes placas (entre las que se encuentra la placa Africana “AF”, la Australiana “AU”, la placa del Caribe “CA”, la de Cocos “CO” y la Norteamericana “NA”) y otras 38 de dimensiones más pequeñas (como Okinawa, Burma, Rivera, Galapagos, etc.) por lo que se reportan un total de 52 placas tectónicas principales (ver Fig. 2.1).

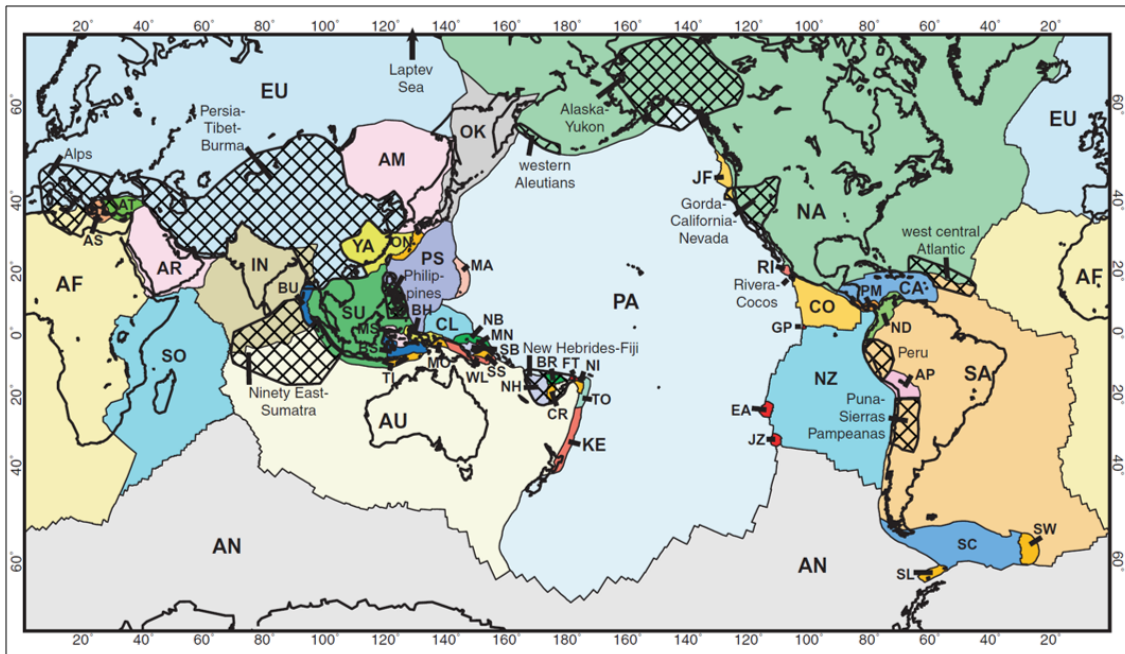


Figura 2.1: Modelo de placas tectónicas “PB2002” donde se muestran las principales placas tectónicas. Imagen tomada de Bird (2003).

Como se puede observar en la Figura 2.1 en México interactúan 5 placas tectónicas:

1. Placa Norteamericana (NA)
2. Placa de Cocos (CO)
3. Placa del Caribe (CA)
4. Placa del Pacífico (PA)
5. Placa de Rivera (RI)

En las zonas de límites entre placas es común tener intensa actividad geológica como lo son erupciones volcánicas o sismos. Lo anterior se puede corroborar viendo el mapa realizado por Lowman Jr y Montgomery (1996), donde ubicaron espacialmente 358, 214 sismos de toda magnitud detectable ocurridos entre 1963 y 1998. El resultado se muestra en la Fig.2.2 donde además se puede constatar que muchos de los epicentros coinciden con los límites entre las placas.

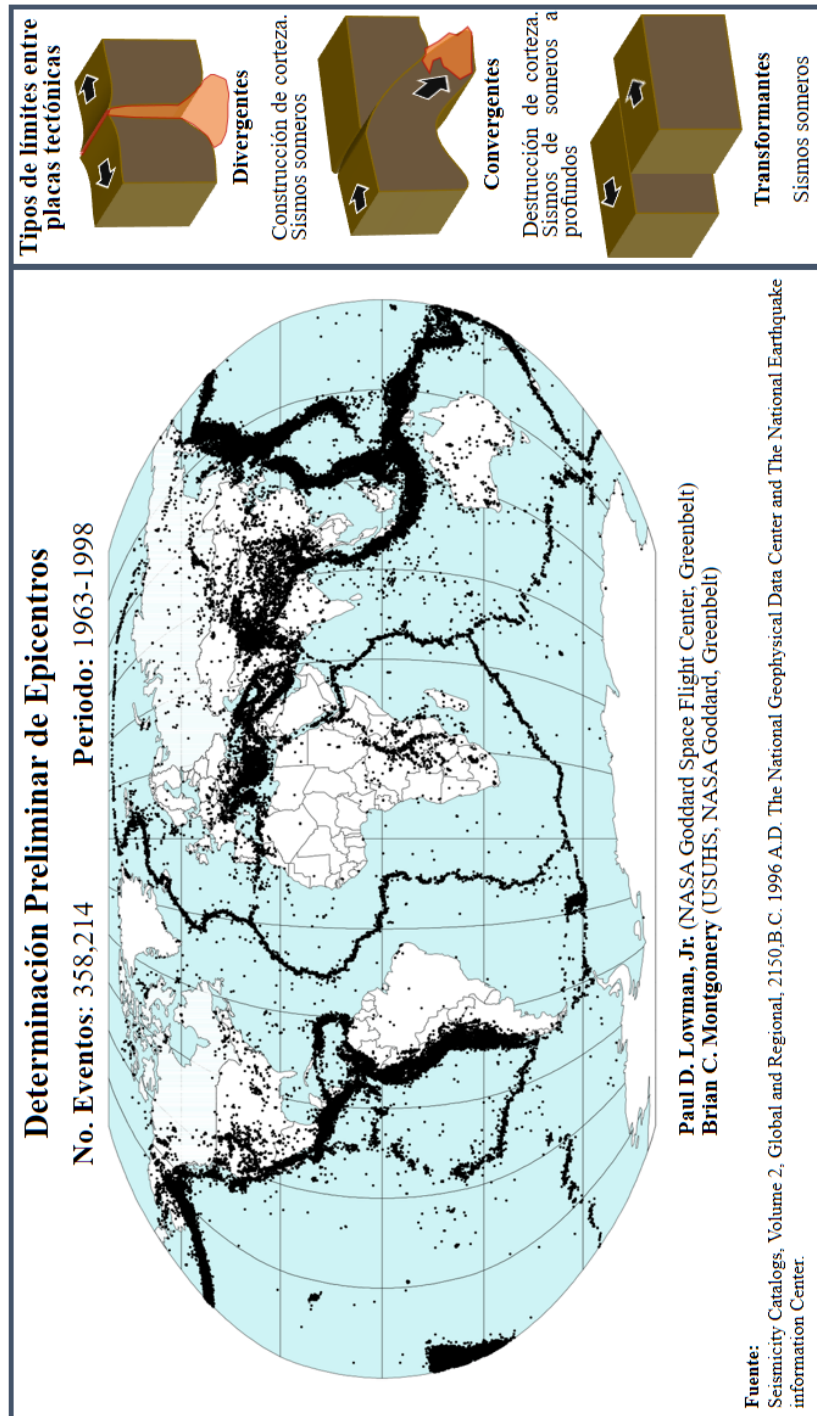


Figura 2.2: Mapa de epicentros y tipos de límites entre placas. Editado de Lowman Jr y Montgomery (1996).

2.2. Fallas

El planeta Tierra es un sistema dinámico cuya actividad afecta en gran medida las rocas que lo componen. Asociado al movimiento de las placas tectónicas y otros procesos geológicos, las rocas son sometidas a esfuerzos de grandes magnitudes que tienden a deformarlas o fracturarlas. Antes de definir lo que es una falla es importante entender cómo es que una roca se comporta cuando es afectada por esfuerzos. Entendemos por deformación a los cambios en la estructura o volumen que sufre un cuerpo debido a los esfuerzos (Gudmundsson, 2011). Según las características y la naturaleza de los esfuerzos, estos pueden ser clasificados en:

- a) **Esfuerzos de Compresión:** las fuerzas son ejercidas con un mismo sentido entre ellas y sobre una línea de acción perpendicular al plano de aplicación.
- b) **Esfuerzos de Tensión:** las fuerzas se aplican sobre un mismo plano pero con sentido opuesto entre ellas.
- c) **Esfuerzos Cortantes:** son aquellas que actúan paralelamente a un plano pero con sentidos opuestos

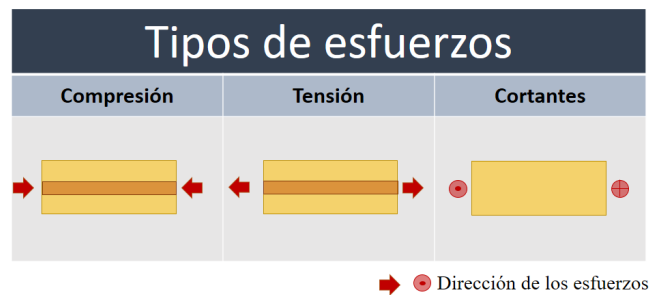


Figura 2.3: Tipos de Esfuerzos

Al ser sometidas a esfuerzos, las rocas pueden exhibir básicamente dos tipos de comportamiento (Gudmundsson, 2011):

- a) **Deformación dúctil:** se refiere a todo cambio en la roca sin que ésta llegue a la ruptura (Lutgens y Tarbuck, 1999). Se dice que tiene un comportamiento elástico cuando el cuerpo tiende a recuperar su forma original una vez que el esfuerzo se deja de aplicar, o un comportamiento plástico cuando los cambios son permanentes una vez que los esfuerzos ceden (un ejemplo de este tipo de deformación son los pliegues).
- b) **Deformación frágil:** al aplicarse los esfuerzos llegará un punto en que la roca cede, por lo que se generará un *plano de discontinuidad* o de *fractura*.

Una “*falla*” es una discontinuidad en un cuerpo rocoso generada por la aplicación de esfuerzos que lo llevan a la fractura (Gudmundsson, 2011). En una falla es posible percibir un desplazamiento paralelo sobre el plano de falla de los bloques generados. De forma general decimos que existen dos principales tipos de fallas según su desplazamiento (ver tabla 2.1). Es importante tener presente que ya en la realidad es muy común encontrar fallas que tienen tanto un desplazamiento vertical como uno horizontal.

Tipos de fallas geológicas		
Tipo	Descripción	Modelo
<i>Strike-slip</i> (Falla de rumbo)	El desplazamiento entre los bloques es paralelo al rumbo del plano de falla. Dependiendo la dirección del desplazamiento respecto a un punto de referencia se pueden subclasificar como falla lateral “sinistral” (si el punto de referencia se encuentra a nuestra izquierda después del desplazamiento) o “dextral” (si el movimiento ocurre hacia la derecha).	<p>El diagrama muestra dos modelos de fallas de rumbo. El modelo superior, etiquetado como 'Sinistral', muestra un plano de falla vertical que divide un bloque rocoso en dos partes. Flechas indican que la parte superior se mueve hacia la izquierda y la parte inferior hacia la derecha. El modelo inferior, etiquetado como 'Dextral', muestra un plano de falla vertical similar, pero con flechas que indican que la parte superior se mueve hacia la derecha y la parte inferior hacia la izquierda. En ambos casos, el plano de falla está etiquetado como 'Plano de falla'.</p>
<i>Dip-slip</i> (Falla de echado)	Este tipo de fallas presenta un desplazamiento paralelo al echado del plano de la discontinuidad. El cuerpo rocoso que queda por encima del plano de falla se le denomina como “bloque de techo” mientras que el que se encuentra por debajo del plano se le conoce como “bloque de piso”. Si el bloque de techo cae respecto al de piso se denomina <i>Falla Normal</i> , o si sube se trata de una <i>Falla Inversa</i> .	<p>El diagrama muestra dos modelos de fallas de echado. El modelo superior, etiquetado como 'Normal', muestra un plano de falla inclinado que divide un bloque rocoso en dos partes: un 'Bloque de piso' inferior y un 'Bloque de techo' superior. Flechas indican que el bloque de techo se mueve hacia abajo y el bloque de piso hacia arriba. El modelo inferior, etiquetado como 'Inversa', muestra un plano de falla inclinado similar, pero con flechas que indican que el bloque de techo se mueve hacia arriba y el bloque de piso hacia abajo. En ambos casos, el plano de falla está etiquetado como 'Plano de falla'.</p>

Tabla 2.1: Tipos de fallas geológicas

A continuación se resumen las principales evidencias geomorfológicas que se espera puedan encontrarse ante la presencia de fallas:

Tipo de falla vs forma de relieve	
Falla	Evidencia
Strike-Slip	<ul style="list-style-type: none"> a) <i>Valles lineales.</i> b) <i>Ríos desviados / desplazados.</i> c) <i>Escarpes.</i> d) <i>Shutter ridges</i> (son cerros o colinas que fueron desplazados por una falla y que obligan a las corrientes a buscar otro sentido de flujo). e) <i>Sag ponds</i> (son depresiones que se forman entre fallas activas y que pueden contener o no cuerpos de agua). f) <i>Springs o manantiales</i> (barreras impermeables o canales permeables generados por la presencia de brechas de falla pueden ocasionar que el flujo de agua subterránea aflore en superficie). g) <i>Benches</i> (son porciones de terreno relativamente planas que están limitadas por otras geoformas notablemente más abruptas). h) <i>Pressure ridges</i> (pequeñas porciones de áreas que presentan deformación por compresión en una zona de falla).
Dip-Slip	<p>Fallas normales</p> <ul style="list-style-type: none"> a) <i>Frentes de montaña lineales</i> (o con pendientes muy pronunciadas). b) <i>Facetas triangulares</i> (un incremento en la incisión de los ríos puede generar este tipo de relieve). c) <i>Escarpes.</i> d) <i>Incremento de actividad volcánica</i> (los esfuerzos extensivos tienden a adelgazar la corteza y/o generar conductos que facilitan el ascenso del magma). e) <i>Horst y graben.</i> <p>Fallas inversas</p> <ul style="list-style-type: none"> a) <i>Pliegues anticlinales.</i> b) <i>Cabalgaduras.</i> c) <i>Escarpes.</i>

Tabla 2.2: Evidencias de fallamiento según Keller y Pinter (1996).

2.3. Comportamiento de fallas strike-slip

Como se definió anteriormente las fallas tipo *strike-slip* son aquellas cuyo desplazamiento es paralelo al plano de fractura. Sin embargo lo anterior no siempre ocurre en sentido estricto, pues muchas fallas de este tipo presentan un movimiento oblicuo y que puede generar una componente de compresión o de tensión. Se le conoce como *Transpresión* cuando se combina un movimiento de *strike-slip* con componente compresiva (lo cual puede generar un levantamiento). Por otro lado, la *Transtensión* es la combinación del *strike-slip* con una componente de tensión y que a diferencia de la transpresión puede generar zonas de subsidencia (Van der Pluijm y Marshak, 2004), ver la Fig. 2.4.

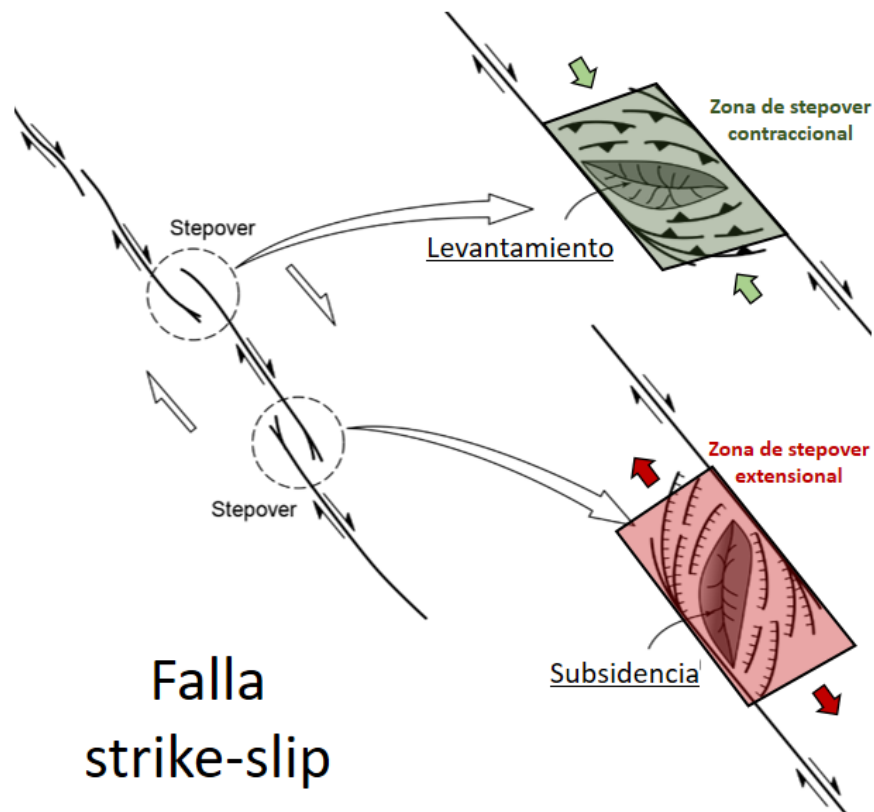


Figura 2.4: Transpresión y transtensión en el *stepover* de una falla *strike-slip*. Editada de Van der Pluijm y Marshak (2004).

Una falla *strike-slip* se le denomina como *falla transformante* cuando corta la litosfera (como sucede en los límites entre placas) o *falla transcurrente* cuando únicamente se encuentra afectando a la corteza (Sylvester, 1988). En una escala regional, el plano de discontinuidad de este tipo de estructuras se puede encontrar segmentado y compuesto por múltiples fallas laterales de longitudes variadas. Es común que estas trazas sean sinuosas

y paralelas entre ellas, de tal modo que donde termina una comienza la otra pero en un diferente plano (ver Fig. 2.4).

Cuando la falla se presenta de forma segmentada y sus trazas se traslapan entre sí pero en diferentes planos, al área que se ubica entre la terminación de una traza y el comienzo de otra se le denomina como “*stepover*”. Como puede observarse en la figura anterior, en un extremo el deslizamiento se acumula sobre un área en específico por lo que fuerzas de compresión ocurren y generan un levantamiento. En el otro extremo los esfuerzos asociados al deslizamiento son liberados por lo que se genera una componente de extensión que puede formar un área de subsidencia. Los levantamientos asociados a transpresión se les conoce como *pressure ridges* mientras que los *sag ponds* son aquellas depresiones causadas por transtensión. Este tipo de discontinuidades presentan cierto grado de complejidad, por lo que Riedel (1929) propuso el siguiente experimento buscando comprender un poco más sobre la generación de estas fallas:

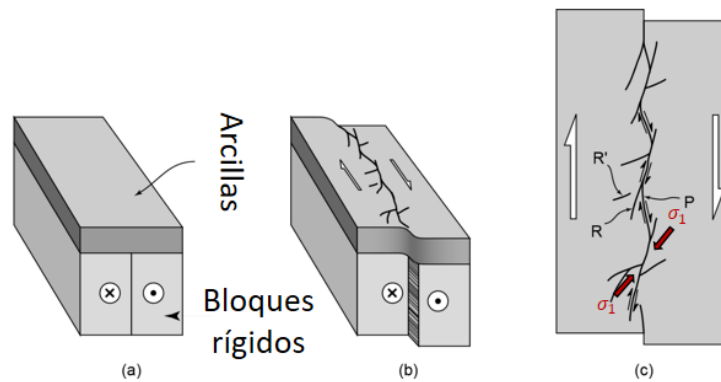


Figura 2.5: Desarrollo de una falla *strike-slip*. Editada de Van der Pluijm y Marshak (2004).

El sistema consiste en una capa de arcillas sobre dos bloques sólidos encontrados. El primer material representa el comportamiento “plástico” de las capas más superficiales de la corteza mientras que los bloques sólidos el comportamiento frágil de las rocas más profundas y, además, el límite entre ellos representa un plano de falla (ver Fig. 2.5 a).

Cuando se ejerce una fuerza de tal modo que los dos bloques sólidos se separan, se genera una deformación en las arcillas, primero una dúctil y después una plástica. Las primeras fracturas que comienzan a aparecer son planos con longitudes cortas y que están inclinadas respecto a la traza principal de la falla *strike-slip*, a estas estructuras se les conoce como “*riedels*” y usualmente aparecen como dos familias distintas: *R* y *R'* (ver Fig. 2.5 b).

Finalmente, Riedel (1929) establece que la bisectriz que corta al ángulo formado entre las dos familias de riedels representa la dirección de aplicación del máximo esfuerzo (σ_1). Conforme se siguen aplicando los esfuerzos se genera una tercera familia de fracturas (P) que une a las estructuras previamente formadas (ver Fig. 2.5 c).

En la Fig. 2.6 se puede observar un esquema de las principales estructuras y formas del relieve que se esperan encontrar cerca de una falla lateral.

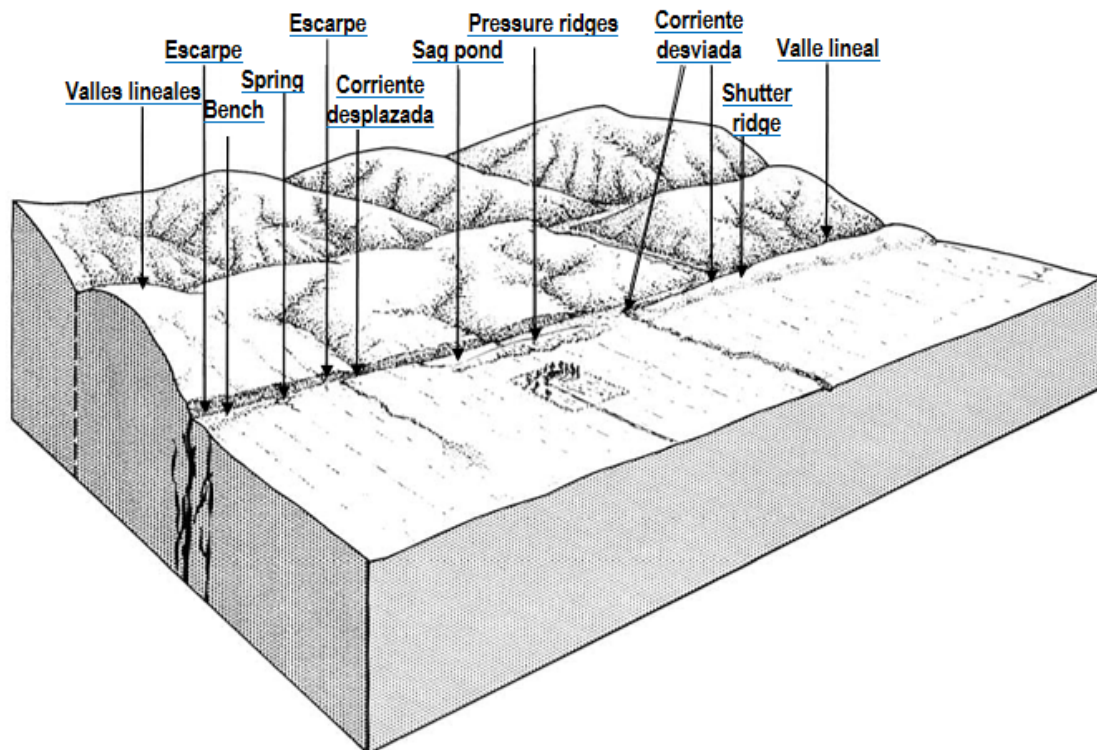


Figura 2.6: Esquema de falla *strike-slip*. Editada de Wallace (1990).

2.4. Sismología

La “*sismología*” se encarga de estudiar las ondas generadas por los sismos. Bull (2008) definió a esta disciplina como el estudio instrumental de los sismos que contribuye en gran medida al entendimiento de la estructura de la corteza y la tectónica que la afecta, lo anterior se realiza mediante la ubicación espacial del hipocentro, la generación de mecanismos focales, la evaluación de la frecuencia, magnitud de los eventos y el estudio de los sismos que ocurrieron en el pasado con el objetivo de conocer los cambios que ha sufrido la distribución de los esfuerzos en la corteza (paleosismología).

Keller y Pinter (1996) señalan que los sismos son el resultado de los procesos dinámicos de la Tierra, los cuales ejercen fuerzas sobre las placas pueden llegar a fracturarlas, por lo que se liberan grandes cantidades de energía que viaja a través de la corteza en forma de ondas sísmicas. Estos eventos pueden ocurrir en los límites donde una placa se encuentre interactuando con otra, por lo que ese sistema es sometido a una inmensa fricción que termina liberándose en algún momento (sismos interplaca). Las ondas sísmicas también pueden ser generadas por la ruptura interna en alguna parte de la placa (sismos intraplaca). El punto donde ocurre la ruptura lo conocemos como “*hipocentro*”, es ahí donde se genera la liberación de energía y las ondas comienzan a disiparse en todas direcciones. Por encima del hipocentro, pero en la superficie, se encuentra lo que denominamos “*epicentro*” (ver Fig.2.7).

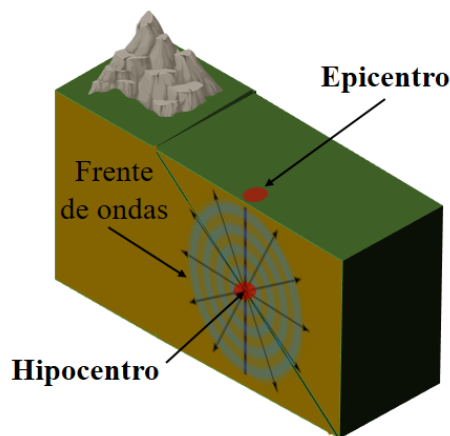


Figura 2.7: Hipocentro y epicentro en un sismo. Elaboración propia.

Las ondas sísmicas son la propagación de energía liberada en un sismo (ver Fig. 2.8). Cuando éstas se transmiten sobre algunas capas de la estructura interna de la Tierra se les conoce como *ondas de cuerpo* (Keller y Pinter, 1996). Las ondas de cuerpo se pueden clasificar en:

1. **Ondas P (Primarias):** son aquellas que presentan una mayor velocidad de tránsito y que generan en los cuerpos movimientos de compresión y dilatación en sentido paralelo a la dirección de la propagación de la onda. Pueden viajar tanto en materiales sólidos como en líquidos.
2. **Ondas S (Secundarias):** estas ondas afectan las formas de los cuerpos a su paso pero no modifican el volumen. El movimiento de las partículas se da en sentido perpendicular al de la propagación de la onda. Solo se pueden transmitir en cuerpos sólidos.

Cuando las ondas viajan en la parte más externa de la corteza se les denomina *ondas superficiales*. Este tipo de ondas son las que impactan en mayor medida a las construcciones y estructuras en la superficie y se clasifican en:

1. **Ondas Rayleigh:** el movimiento de las partículas se da en un plano vertical y sigue una trayectoria elíptica (misma dirección de onda P + una componente vertical de onda S).
2. **Ondas Love:** el movimiento se da sobre un plano horizontal con una dirección perpendicular al sentido de propagación y se ha asociado a la interferencia entre ondas de tipo “S”.

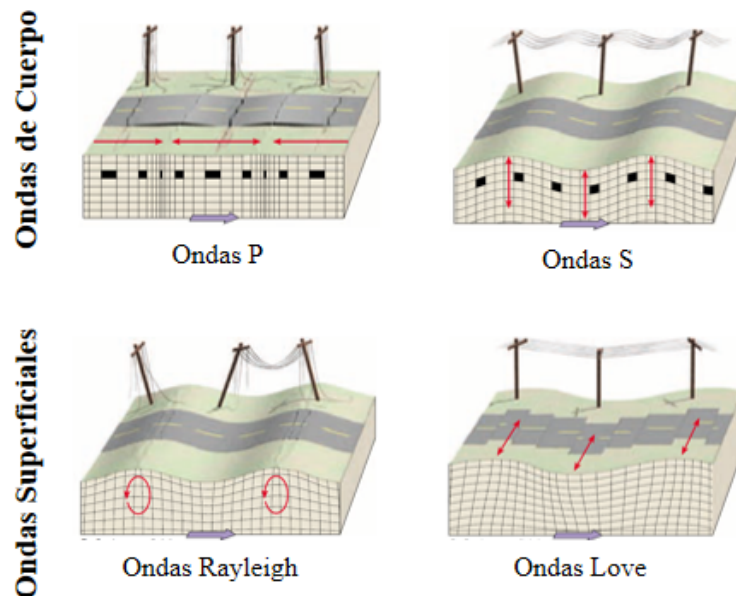


Figura 2.8: Ondas sísmicas de cuerpo y superficiales. Tomada de Tarbuck et al. (2005)

2.5. Sismos

En general la palabra *sismo* es utilizada para referirnos a una rápida y repentina liberación de energía producida cuando dos bloques de corteza se deslizan entre ellos a través de un plano de falla. La energía liberada es transmitida mediante ondas elásticas que pueden ser detectadas por instrumentos conocidos como sismógrafos. Sin embargo, es conveniente resaltar que con el avance tecnológico que se ha tenido en la detección y medición de terremotos, se han identificado otros procesos que de igual forma producen deformación en la superficie terrestre pero que no generan ondas sísmicas o que si las generan son con características tales que no pueden ser detectadas por los sismógrafos (Arora et al., 2011). Según la velocidad con que ocurre el deslizamiento de los bloques de falla o las características de las ondas generadas o incluso la fuente que genera la liberación de energía podemos tener distintos tipos de terremotos. Para los objetivos de este trabajo se definen los siguientes:

- a. **Sismos “convencionales”**: Suceden cuando se genera una rápida liberación de energía en una región donde los límites de resistencia de los cuerpos rocosos han sido superados. La liberación de energía se da sobre el plano de ruptura mediante ondas elásticas que viajan en todas direcciones.
- b. **Sismos lentos**: Al igual que los sismos “ordinarios” estos ocurren por un deslizamiento de una falla, sin embargo la diferencia radica en que la liberación de energía se desarrolla a tasas de tiempos muy largas, por lo que las ondas liberadas (si es que se generan) son de intensidades muy débiles (Beroza y Ide, 2011). La ocurrencia de los sismos lentos puede considerarse una evidencia de que la ruptura en un plano de falla se lleva a cabo en diferentes escalas temporales. Estos eventos se pueden desarrollar con bajas tasa de propagación de ruptura, con episodios de deslizamientos lentos o con ambas.

En las zonas de subducción las rocas pueden presentar diferentes comportamientos a lo largo del plano de falla (el cual está formado por la interfaz entre las dos placas que interactúan). Esta diferencia en comportamientos afectará la manera en que las placas se deslizan entre ellas. Durante este proceso podemos identificar 3 diferentes regiones (las cuales se muestran de forma esquemática en la Fig. 2.9) :

- I. Zona sismogénica (o de bloqueo): cerca a la superficie y asociado al comportamiento rígido de las rocas, las placas tectónicas tienen dificultad para deslizarse, por lo que se generan grandes acumulaciones de energía por fricción que terminará siendo liberada de manera brusca y repentina en forma de sismos.
- II. Zona de transición: el deslizamiento entre las placas se encuentra parcialmente bloqueado, lo que propicia una lenta liberación de energía que no generan terremotos pero si deformación en la corteza.

- III. Zona de deslizamiento estable: a grandes profundidades las rocas se encuentran sometidas a altas presiones y temperaturas por lo que su comportamiento será más dúctil respecto a las que se encuentran cercanas a la superficie. Esta condición permite que el deslizamiento entre las placas sea de manera constante.

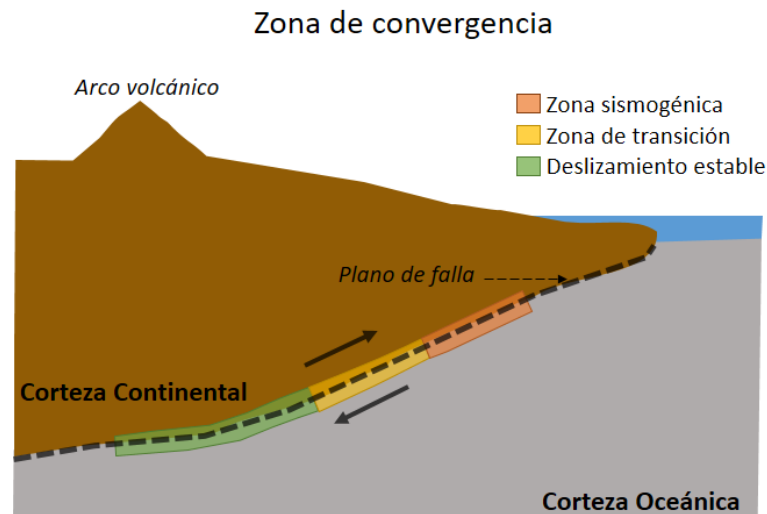


Figura 2.9: Tipo de deslizamiento a través de un plano de falla en una zona de subducción. Editada de: Obara y Kato (2016).

Una herramienta muy útil para identificar actividad sísmica sobre las fallas es el registro sísmico histórico, sin embargo hay que recordar que la instrumentación para cuantificar los sismos es relativamente nueva y que en el caso de México los registros de este tipo se limitan a poco más de 100 años hacía atrás (cuando fue creado el Servicio Sismológico Nacional el 5 de Septiembre de 1910). El sesgo en la información sobre este tipo de eventos puede y debe ser cubierto con el estudio de los rasgos en el relieve y otros parámetros asociados como: el patrón de drenaje, registro litológico, tasas de erosión, entre otros. La búsqueda de evidencia sobre la ocurrencia de temblores en el registro geológico se le conoce como *Paleosismología* que se encarga del estudio de la distribución espacio-temporal de los sismos que ocurrieron en el pasado, así como sus desplazamientos e interacción con los sistemas de fallas existentes (Burbank y Anderson, 2011).

2.5.1. Deslizamientos lentos

Los *deslizamientos lentos* o conocidos también como *Slow Slip Events (SSEs)* son movimientos constantes y con bajas velocidades que se van dando sobre el plano de una falla y que no genera una liberación brusca de energía (Keller y Pinter, 1996). En la actualidad este proceso sigue sin entenderse completamente y aún es tema de debate entre la comunidad científica, sin embargo se han propuesto dos principales mecanismos que pueden favorecer la ocurrencia de este deslizamiento asísmico:

1. Presencia de filosilicatos como algunas arcillas u otros minerales con enlaces débiles en las zonas de fractura (Carpenter et al., 2011).
2. Altas presiones de fluidos entrampados en las zonas de fallamiento (Byerlee, 1990).

Según Çakir et al. (2012), recientes investigaciones sugieren que los deslizamientos lentos están controlados principalmente por la presencia de rocas frágiles más que por las presiones de los fluidos entrampados.

Este tipo de eventos no puede ser detectado por los sismógrafos, se requiere de instrumentos GPS que permitan detectar los milimétricos desplazamientos asociados a este tipo de eventos. La utilidad de estudiar este tipo de desplazamientos está en que éstos podrían ser indicadores de liberación de energía acumulada en las zonas de fallas.

Fasola et al. (2019) mencionan que estos eventos pueden ocurrir en las profundidades de las zonas de subducción, donde hay condiciones que propician estados de deslizamientos estables. Además mencionan que por lo general estos movimientos van acompañados de *tremores tectónicos* o *Nonvolcanic tremor* que son sismos de muy baja frecuencia, por lo que eventos con estas características podrían ser utilizados como herramientas para identificar la ocurrencia de deslizamientos lentos.

2.6. Tectónica activa (TA)

De forma general se define a la “*Tectónica*” como todos los procesos asociados a la dinámica interna de nuestro planeta y que generan una deformación en la corteza terrestre, así como diversos procesos que afectan el ciclo de las rocas. En cuanto a tiempo, hablamos de una escala regional cuando las consecuencias de la tectónica son la creación de montañas, grandes masas continentales, formación de piso oceánico, terremotos y/o volcanes.

Keller y Pinter (1996) definieron como “*Tectónica activa*” al estudio de la evolución de la forma del relieve asociada a los procesos del sistema planeta Tierra. Se le denomina “activa” para hacer referencia a la evolución del relieve asociado a eventos tectónicos que ocurren en un periodo de tiempo perceptible para los humanos y sus sociedades. Según Keller y Pinter (1996), dos de los principales objetivos de la *Geomorfología tectónica* son:

1. Estudio de las formas del relieve generadas por procesos tectónicos.
2. Aplicación de principios geomorfológicos para la solución o mitigación de problemas asociados a tectonismo.

El campo de estudio de la *tectónica activa* incluye únicamente a los movimientos y deformaciones corticales que ocurrieron o se esperan que ocurran durante el tiempo que el *ser humano* ha existido como tal. Por otro lado, la *neotectónica* tiene un rango temporal mucho más amplio y estudia aquellos eventos que han sucedido durante el *Cenozoico tardío* (por lo que es común utilizar este término para hacer referencia a la evolución estructural a una escala regional).

Una herramienta de gran utilidad en la tectónica activa es el análisis de las formas del relieve, pues es en las rocas, en la forma en que se disponen y en sus discontinuidades que aquellos procesos que las afectaron quedan registrados. Keller y Pinter (1996) proponen que cualquier falla geológica que ha presentado movimiento durante el Cuaternario (aproximadamente 2.5 ma) puede ser clasificada como una falla activa y aquellas que no han tenido actividad en los últimos 1.6 ma son consideradas como inactivas. Por otro lado, la USGS establece en su *Glosario Sísmico* que una falla activa es aquella que ha presentado uno o más movimientos en un periodo de 10,000 años.

Capítulo 3

Marco Geológico

3.1. Contexto regional

3.1.1. Ambiente tectónico

Los límites convergentes que rodean casi todo el Océano Pacífico forman parte de una gran área conocida como *El Cinturón de Fuego del Pacífico* y que representan las principales zonas de subducción del mundo, por la que la actividad sísmica y volcánica son muy recurrente en estas partes. Como ya se detalló anteriormente, el área de estudio se encuentra en la zona de subducción entre la *Placa de Cocos* y la *Placa Norteamericana*. Tan solo en el primer semestre del año 2019 el Sismológico Nacional reportó alrededor de 7,652 sismos en el estado de Oaxaca, 1,943 en Guerrero, 1,940 en Chiapas, sumando un total de 11,535 eventos en los primeros 6 meses de este año. El temblor de mayor magnitud en este periodo ocurrió en Chiapas con una magnitud de 6.5, mientras que para el estado de Guerrero el de mayor magnitud reportada fue de 5.1 (ver Fig.3.1).

La formación de la *Placa Cocos* se remonta aproximadamente a unos 22.7 MA hacia atrás (Barckhausen et al., 2001). Hey (1977) menciona que de acuerdo con el análisis de información magnética y batimétrica obtenida en la porción este del pacífico, se estableció que la *Placa de Farallón* se rompió a lo largo de una zona de fractura pre-existente dando origen a las placas de *Cocos* y la de *Nazca* (Lonsdale, 2005). Según la *Plate Motion Calculator* de la Universidad de Tokyo (Okino, 2018) la velocidad con que *Cocos* se encuentra subduciendo en nuestra zona de interés es de aproximadamente 6,7 cm/año.

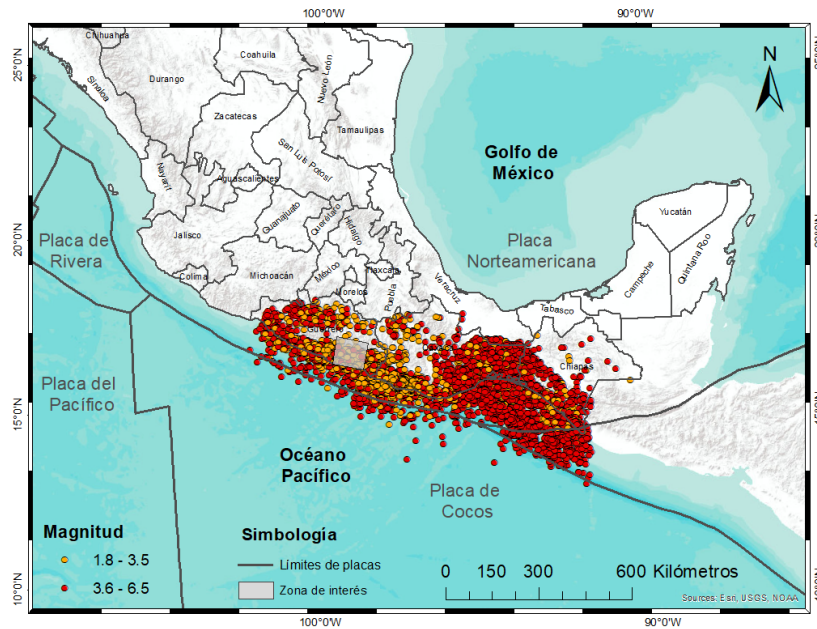


Figura 3.1: Sísmicidad en las costas del Pacífico Mexicano. Elaborado con ArcMap,2019.

3.1.2. Terrenos tectonoestratigráficos

Varios autores han establecido que el territorio mexicano está constituido por diferentes segmentos que pueden ser diferenciados entre ellos por el tipo de rocas que contienen, su origen, la edad, la distribución geográfica y los rasgos tectónicos. Con base a todas esas características se ha establecido la existencia de diferentes zonas geológicas conocidas como *Terrenos tectonoestratigráficos*, y cuyos límites están constituidos por elementos de origen tectónico. Uno de los primeros trabajos publicados sobre esta división fue presentado por Campa (1983). En su artículo agrupan los diferentes terrenos que describieron en 3 grandes categorías según su ubicación:

Zona I. Noroeste de México

- a) *Terreno Chihuahua*
- b) *Terreno Caborca*

Zona II. Este de México

- a) *Terreno Coahuila*
- b) *Terreno Maya*

c) *Sierra Madre*

Zona III. Oeste de México

a) *Terreno Alisitos*

b) *Terreno Guerrero*

c) *Terreno Juárez*

d) *Terreno Mixteca*

e) *Terreno Oaxaca*

f) *Terreno Xolapa*

g) *Terreno Vizcaino*

Otros

a) *Sonabari*

b) *Terreno José de las Rusias*

El origen de estos terrenos se sustenta en la *Teoría de la Tectónica de Placas*, sin embargo estos no pueden ser considerados como placas debido a las dimensiones que tienen. Centeno-García (2017) presentó una actualización a la clasificación de Campa (1983) en donde considera 3 grandes grupos en función las firmas isotópicas que presentan las rocas ígneas y la distribución de los afloramientos de sus basamentos:

- 1. Terrenos de Laurencia:** Se refiere a aquellos que tienen un basamento precámbrico y/ o firmas isotópicas en sus rocas ígneas (de edades jóvenes) asociadas a una corteza antigua.
- 2. Terrenos Atlánticos-Gondwánicos:** Son aquellos de basamento precámbrico con un alto grado de metamorfismo o uno paleozoico con un grado de bajo a medio como lo son los Terrenos Maya, Cuicateco, Juchatengo, Mixteca, Parral y Oaxaquia (Centeno-García, 2017).
- 3. Terrenos del Pacífico:** En estos terrenos se pueden encontrar rocas que datan desde el Paleozoico superior hasta el Mesozoico, además de rocas metamórficas e ígneas que presentan firmas isotópicas de edades más recientes. Dentro de este grupo se encuentran los terrenos Xolapa, Vizcaíno, Alisitos, Central y el Terreno Compuesto de Guerrero (Centeno-García, 2017).

Por otro lado, Sedlock et al. (1993) señalaron la existencia de 17 terrenos tectonoestratigráficos en México y parte de la porción norte de América Central. La teoría que propusieron los autores refiere que gran parte de México (a excepción del límite sur y occidental) tuvo poca deformación durante el Cretácico y Cenozoico. Los terrenos propuestos por Sedlock et al. (1993) se puede observar en la siguiente imagen:

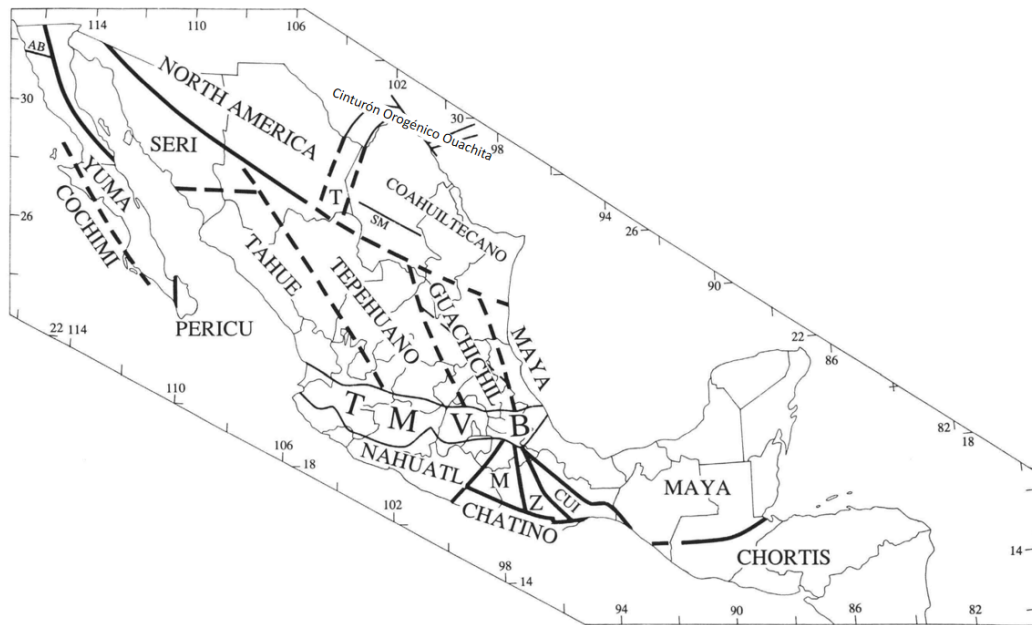


Figura 3.2: Límites de terrenos tectonoestratigráficos propuestos por Sedlock et al. (1993). Las líneas gruesas y continuas corresponden a los límites entre terrenos según los autores, las líneas punteadas son límites inferidos. Las abreviaturas de los terrenos corresponden a: CUI-Cuicateco, M-Mixteco, T-Tarahumara, Z-Zapoteco. La falla Agua Blanca se señala con las letras AB, la falla San Marcos con las letras SM y el Cinturón Volcánico Transmexicano está indicado con las letras TMVB. Tomada de Sedlock et al. (1993).

A grandes rasgos, las principales diferencias que presentan las diversas clasificaciones que existen, son la ubicación de los contactos entre los terrenos y la parte de la descripción de las rocas que los constituyen. El área de estudio de este trabajo (ver Fig. 3.4) se encuentra dentro de los terrenos conocidos como *Xolapa* y *Mixteca* (Campa, 1983) y que Centeno-García (2017) clasifica dentro del grupo “*Terrenos del Pacífico*” y “*Terrenos Atlánticos-Gondwánicos*” respectivamente. Además de los *Terrenos Mixteca* y *Xolapa*, consideraremos el *Terreno Guerrero* debido a que una porción del área estudiada por Gaidzik et al. (2016) se encuentra sobre este.

Terreno Guerrero

Este terreno, denominado así por Campa (1983) o también conocido como *Terreno Náhuatl* (Sedlock et al., 1993), fue acrecionado a la masa continental que hoy es México durante el Mesozoico y se extiende desde el sur hasta la parte central del margen del Pacífico mexicano. Además, debido a las diferencias en sus rasgos estructurales, estratigráficos y composicionales (Centeno-García et al., 2005) puede subdividirse en:

1. **Subterreno Teloloapan:** Corresponde a una sucesión de arco submarino que data desde el *Kimmeridgiano* al *Aptiano* y que está compuesta por flujos de lavas basálticas a andesíticas tanto masivas como almohadilladas, otras lavas de intermedias a félsicas y por rocas volcanoclásticas (Talavera-Mendoza et al., 1995; Centeno-García, 2017). Adicionalmente se pueden encontrar lutitas y areniscas volcánicas con edades que van del *Aptiano* al *Albiano*. Sobreyaciendo a las rocas volcanoclásticas se encuentran carbonatos asociados a un ambiente de arcos de islas y depósitos turbidíticos del *Turoniano*.
2. **Subterreno Arcelia:** En este terreno podemos encontrar pillow lavas, hialoclastitas, rocas ultramáficas, cherts, y turbiditas volcanoclásticas (Ramírez-Espinosa et al., 1991; Centeno-García, 2017). Existen dos teorías sobre el origen de este terreno, una indica que se puede asociar a un ambiente de tras-arco y otra que puede estar constituido por rocas de un antiguo arco de islas y cuenca de tras-arco.
3. **Subterreno Tahue:** El basamento de este subterreno está constituido por el complejo metamórfico “El Fuerte” (facies de esquisto verde), volcanosedimentos en un ambiente de arcos volcánicos (Centeno-García et al., 2008), depósitos de turbiditas marinas (cuya unidad contienen fósiles del Pensilvánico medio al Pérmico temprano Carrillo-Martínez (1971)), ortogneis del Triásico (Keppie et al., 2006) e intrusiones de cuerpos ultramáficos a máficos del Cretácico.
4. **Subterreno Guanajuato:** En esta área podemos encontrar materiales asociados a ambientes de arco y tras-arco como lo son pillow lavas, rocas ígneas félsicas y areniscas (Centeno-García, 2017).
5. **Subterreno Zihuatanejo:** Depósitos turbidíticos ricos en cuarzo son los materiales más antiguos que podemos encontrar en este terreno y que corresponden al *Triásico Superior*. Además, también es posible observar calizas, pillow lavas, diabasas, gabros (Centeno-García et al., 1993). Estos materiales fueron metamorfozados y deformados durante el *Jurásico Medio Tardío*, se les conoce como *Complejo Arteaga* y *Complejo Las Ollas* (ligados a una zona de subducción).

Centeno-García et al. (2011) señalan que la principal diferencia entre este terreno y los ubicados en sus alrededores es la gran cantidad de rocas volcánicas y volcanoclásticas que contienen. El origen de este terreno aún es incierto ya que existen dos grandes teorías sobre el mismo (ver Fig.3.3): una afirma que tiene un origen alóctono, donde un arco intraoceánico o un sistema de arcos formados en el *paleo-Pacífico* se acrecionó a Norte América durante los procesos de subducción (Tardy et al., 1994; Dickinson y Lawton, 2001). Por otro lado, otra teoría sugiere que este terreno tiene un origen autóctono, donde las secuencias rocosas se formaron sobre el margen continental mexicano (Lang et al., 2013; Martini et al., 2009).

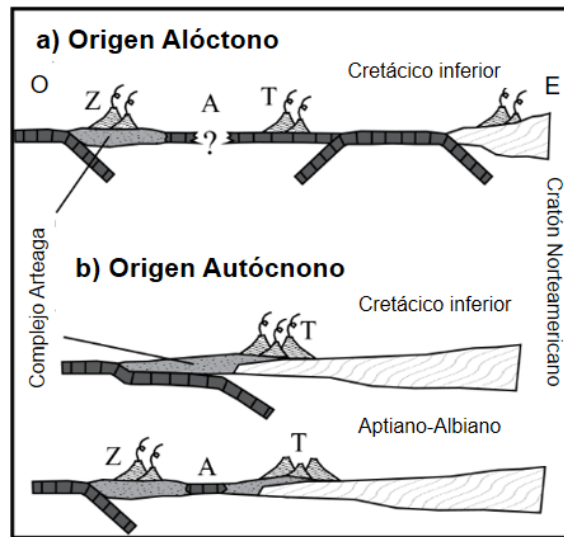


Figura 3.3: Esquema de las teorías sobre el origen del Terreno Guerrero. La letra Z señala la ubicación del *Terreno Zihuatanejo*, la A del *Terreno Arcelia* y la T del *Terreno Teloloapan*. Editado de Martini et al. (2010).

Terreno Xolapa

A través de los estados de Guerrero, Oaxaca y sobre las costas del pacífico mexicano es posible encontrar una franja paralela a la trinchera de aproximadamente 600 km de largo (Ortega-Gutiérrez, 1981) y que se conoce como *Terreno Xolapa* (Campa, 1983) o *Terreno Chatino* (Sedlock et al., 1993). Al norte limita con el *Terreno Guerrero* y el *Mixteca*, además, con este último se encuentra separado mediante una gran falla lateral izquierda (Ducea et al., 2004; Solari et al., 2007; Tolson, 2007).

Al igual a como sucede en otros terrenos tectonoestratigráficos, el origen de este genera muchos debates, sin embargo muchos autores coinciden en que el *Terreno Xolapa* es un remanente de las raíces de un arco magmático continental que data del *Jurásico inferior* al *Cretácico*. Talavera-Mendoza et al. (2013) señalan la existencia de un intenso periodo de metamorfismo y migmatización durante el *Cretácico - Paleógeno* y una exhumación en el *Neógeno*.

Este terreno está conformado por tres diferentes secuencias de materiales:

1. Un basamento conocido como *Complejo Xolapa* y que está constituido por rocas plutónicas con cierto grado de metamorfismo como metatonalitas, metagranitos y metagranodioritas con edades del *Proterozoico* y *Paleozoico*. Además es posible encontrar esquistos con granate y biotita, cuarcitas y metagrauvascas del *Jurásico*

inferior. La mayoría de estos materiales presentan un alto grado de metamorfismo, deformación y procesos de migmatización.

2. Rocas ígneas intrusivas no deformadas de composición diorítica a granítica con edades entre *Oligoceno-Mioceno* (Morán-Zenteno, 1993).
3. Diques doleríticos de origen y edades desconocidas.

Según Campa (1983) en este terreno no hay acumulación de material sedimentario o de origen volcánico sobre la superficie a excepción de los sedimentos del *Neógeno-Cuaternario* que pueden observarse en el prisma de acreción de la trinchera de Acapulco.

Terreno Mixteca

El *Terreno Mixteca* (Campa, 1983) o *Mixteco* (Sedlock et al., 1993) fue acrecionado a los otros terrenos durante el Pérmico (Elías-Herrera y Ortega-Gutiérrez, 2002) y está conformado por una unidad polideformada y metamorfiza conocida como *Complejo Acatlán*. Las rocas metamórficas del basamento presentan evidencias de procesos de subducción y una posterior obducción durante el *Paleozoico Temprano* (Elias-Herrera et al., 2000). Este complejo está cubierto por capas no metamorfizadas de siliciclásticos marinos y carbonatos de edades entre el *Misisípico* y *Pérmico*, ignimbritas y andesitas del *Triásico* y rocas volcánicas y clásticas del *Cenozoico* (Elias-Herrera et al., 2000).

El complejo Acatlán son grupos de rocas metamórficas polideformadas que pueden dividirse en dos secuencias diferentes, una de alta presión y otra de baja (Ortega-Gutiérrez et al., 1999):

1. **Grupo Petlalcingo:** es considerado como un grupo con bajo grado de metamorfismo y está constituido por las migmatitas de la *Formación Magdalena*, esquistos de la *Formación Chazumba* y cuarcitas, filitas y pillow lavas de la *Formación Cosoltepec*. Además, dentro de este grupo se pueden encontrar diques del *Jurásico* (Yáñez et al., 1991).
2. **Grupo Piaxtla:** Es una unidad que presenta un alto grado de metamorfismo que se encuentra por encima del grupo Petlalcingo debido a una cabalgadura. Contiene eclogitas, anfibolitas de la *Formación Xayacatlán* y granitoides (Yáñez et al., 1991; Ortega-Gutiérrez et al., 1999).

El contacto de este terreno con el de *Guerrero* está definido por un sistema de cabalgaduras conocido como *Sistema de fallas Teloloapan* (Campa, 1983) mientras que al *Complejo Oaxaqueño* lo limita con una falla transpresional conocida como “Falla Caltepec” y por el sur se puede encontrar la falla lateral izquierda “*Chacalapa-La Venta*”.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

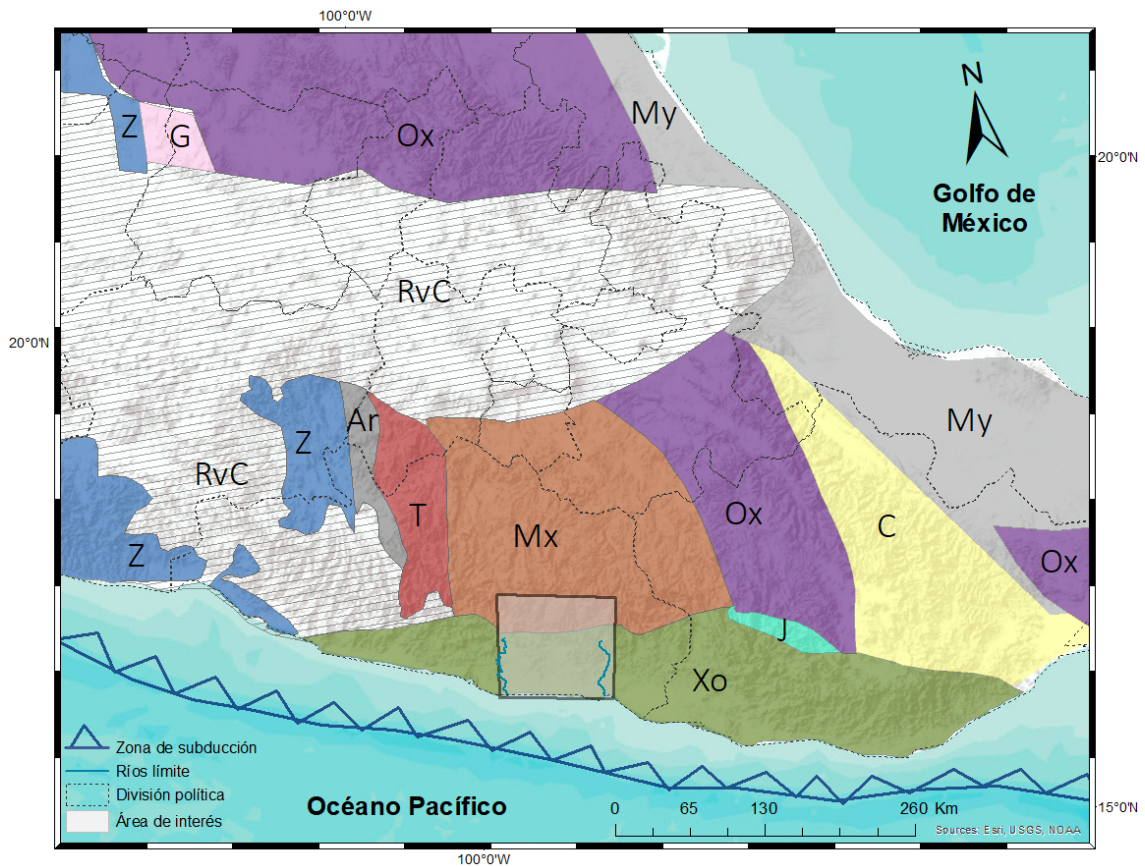


Figura 3.4: Terrenos tectonoestratigráficos donde se encuentra contenida el área de estudio (rectángulo blanco) que está delimitada por los Ríos *Papagayo* y *Marquelia* (de izquierda a derecha respectivamente). Los Terrenos que se muestran son: Terreno Maya (My), Terreno Cuicateco (C), Oaxaquia (Ox), Terreno Xolapa (Xo), Terreno Mixteca (Mx), Terreno Juchatengo (J) y el Terreno Compuesto de Guerrero (Terreno Guanajuato-G, Terreno Teloloapan-T, Terreno Zihuatanejo-Z, y el Terreno Arcelia-Ar). Las rocas volcánicas del Cenozoico se indican con las letras RvC. Editado de Campa (1983) y Centeno-García et al. (2011). Elaborado con ArcMap (2019).

3.2. Contexto local

Para este trabajo se consideró la litología reportada por el *Servicio Geológico Mexicano (SGM)*. El área de estudio está contenida dentro de las siguientes cartas geológico-mineras (ver mapa en Fig. 3.5):

Cartas Geológico-mineras del SGM					
Carta	Clave	Escala	Ubicación	Autor	Base informativa
Acapulco	E14-11	1:250 000	Guerrero y Oaxaca	SGM	INEGI
Chilpancingo	E14-8	1:250 000	Guerrero, Oaxaca y Puebla	SGM	INEGI, PEMEX

Tabla 3.1: Cartas Geológico-mineras utilizadas

Los diferentes tipos de litologías que pueden encontrarse dentro de nuestra zona de investigación según las cartas del *SGM* se detallan a continuación (ver Tabla 3.2).

Rocas metasedimentarias del Complejo Xolapa

- ***Gneis***: Hay tanto de protolitos ígneos como sedimentarios y son los que tienen una mayor presencia en el área. Estos materiales presentan foliación y bandas de color blancas y oscuras, además, hay partes con alto grado de fracturamiento. Como consecuencia de intemperismo es posible observar la presencia de óxidos de hierro. En muestra de mano es posible identificar la presencia de cuarzo, micas y feldespatos. En lámina delgada el SGM reportó la presencia de mica, cuarzo y feldespato como minerales primarios, mientras que la hematita y montmorillonita son fases secundarias. Los ortogneis provienen de cuerpos plutónicos de color gris claro y textura fanerítica. En muestra de mano las texturas que se reconocen son granulares, lepidomórficas.
- ***Migmatitas***: Son cuerpos que presentan un bandeamiento bien definido y que se asocia a la presencia de micas y/o cambios en la granulometría. Contiene cuarzo en forma lenticular. Como minerales principales tiene cuarzo, plagioclasas, mica y granate. Estas rocas están intrusionadas por diques tanto de composición máficos como félsicos.
- ***Cuarcitas***: Roca de grano fino y de color gris verdoso con alto grado de fracturamiento y textura granoblástica. Se puede identificar la presencia de cuarzo y micas.

- **Esquistos:** Como minerales primarios tienen biotita y granates. Es una roca de color gris claro, de aspecto sedoso. En muestra de mano se puede identificar la existencia de cuarzo, feldespatos y ferromagnesianos. Microscópicamente tiene textura lepidoblástica.

Granito- Granodiorita

Son cuerpos plutónicos no deformados y poco fracturados. Presentan un grado considerable de intemperismo. En muestra de mano las fases que se pueden identificar son cuarzo, feldespatos, biotita y óxidos de hierro. Al microscopio presenta textura granular holocristalina. Se pueden encontrar variaciones locales entre granitos (de hornblenda, de biotita o calco-alcálicos), granodioritas (de biotita y hornblenda) y en algunos casos dioritas (de hornblenda). Estos cuerpos intrusivos se pueden encontrar afectando a los *Terrenos Xolapa* y *Mixteco*.

Rocas del Complejo Acatlán

Las rocas metasedimentarias que pueden ser encontradas sobre el *Terreno Xolapa* son: filitas, cuarcitas y esquistos.

Depósitos Cuaternarios

Los depósitos localizados sobre las playas (depósitos de litorales) tienen partículas que van desde tamaños finos a grueso, con colores de amarillo a gris claro y en algunas zonas es posible encontrar restos de materia orgánica. El SGM reporta también otros depósitos arcillo-aluminosos que se encuentran interdigitados con arenas finas y que se acumulan en medios acuosos. En algunas partes estos están en contacto con los depósitos de litorales.

Rocas del Terreno Mixteco

Al rededor del 70% de las rocas en la carta de *Chilpancingo* corresponden a litologías de este terreno. Como ya se mencionó anteriormente, el *Terreno Mixteco* está constituido por rocas de lo que se denomina como *Complejo Acatlán* y que en general está constituido de: granitoides, paragneis, esquistos y migmatitas.

Mineralogía de algunas rocas presentes en nuestra área según el SGM		
Fase Mineral	%	Descripción
<i>Gneis</i>		
Cuarzo	25-50	Cristales anhedrales alargados en sentido paralelo a la foliación
Albita, Oligoclasa	5-25	Cristales subhedrales y están siendo alterados a sericita
Biotita	5-25	Cristales subhedrales con alteraciones a clorita
Magnetita	5	Se encuentra de forma dispersa y alterándose a hematita
Secundarios	—	Clorita, hematita, montmorillonita
<i>Cuarcita</i>		
Cuarzo	—	Cristales anhedrales dispuestos en mosaicos
Moscovita	—	Cristales euhedrales dispersos y orientados
Granate	—	Cristales anhedrales diseminados
<i>Esquisto</i>		
Biotita	25-50	Cristales subhedrales con hábito lamelar y que forma bandas oscuras
Cuarzo	5-25	Cristales anhedrales con bordes irregulares
Albita - oligoclasa	5-25	Cristales Subhedrales asociados a biotita y cuarzo
Feldespatos K	5	Cristales subhedrales
Granate	5	Cristales euhedrales
Secundarios	—	Sericita, clorita, hematita
<i>Granodiorita</i>		
Albita - oligoclasa	5-25	Cristales Subhedrales con zonamiento
Ortoclasa	5-25	Cristales subhedrales
Cuarzo	5-25	Cristales subhedrales dispuestos en mosaicos con formas granulares
Biotita	5-25	Cristales subhedrales, algunos se encuentran incluidos en las plagioclasas
Magnetita	5	Se encuentra en los bordes de las biotitas
Secundarios	—	Hematita, Clorita

Tabla 3.2: Mineralogía del área de estudio de acuerdo al *SGM*

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

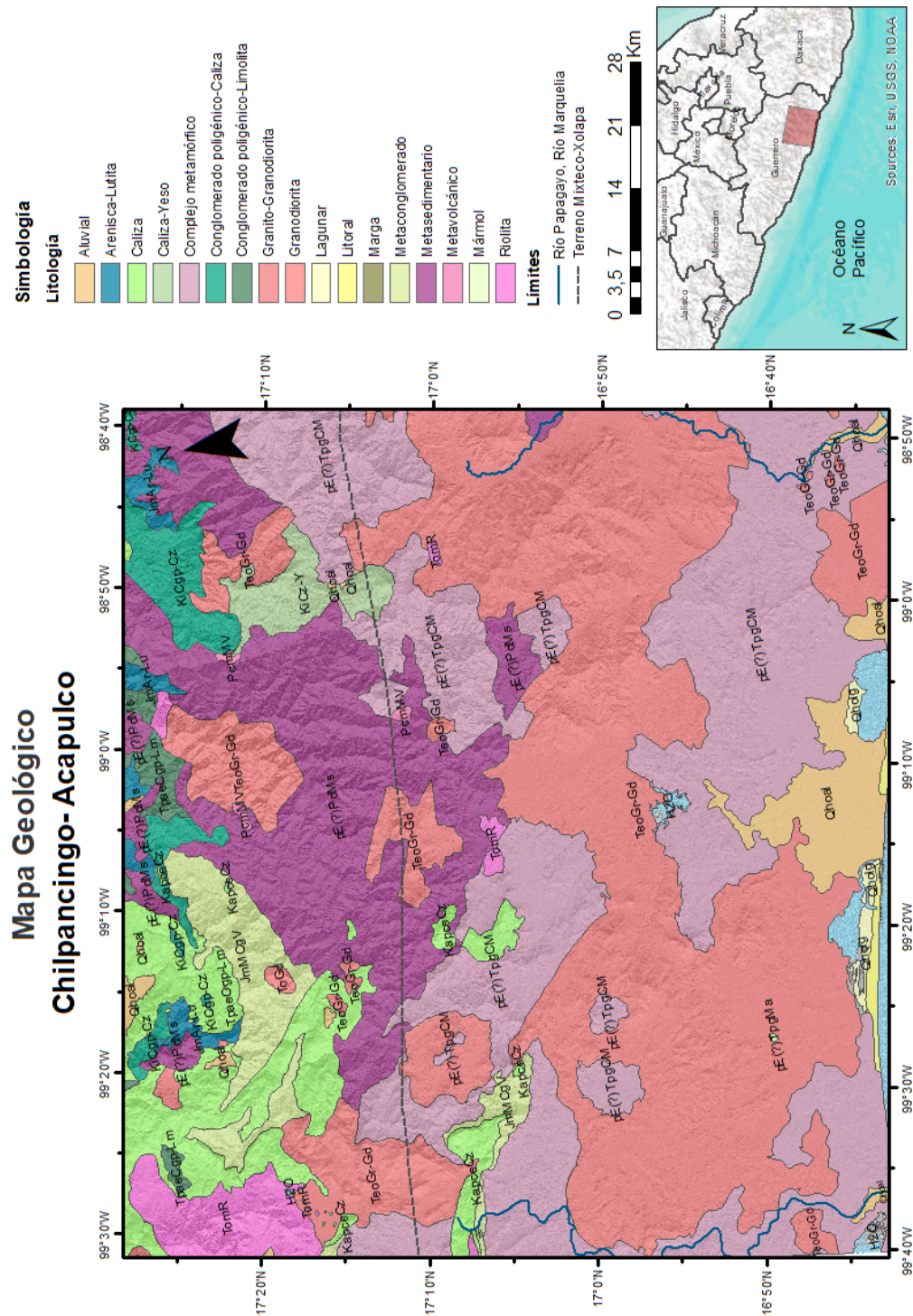


Figura 3.5: Mapa geológico del área de estudio. Las litologías son las reportadas en las cartas “E14-8” y “E14-11” del *Servicio Geológico Mexicano*, la base cartográfica fue tomada del *INEGI*.Elaborado con ArcMap (2019).

Capítulo 4

Metodología

En una primera fase de este trabajo se estudió el relieve y el patrón de drenaje del área de interés con ayuda de *Google Earth Pro* (versión 7.3.2.5) y los *Sistemas de Información Geográfica (SIG)* como *ArcMap* (versión 10.6.1). La información tanto de tipo vectorial (cuerpos de agua, curvas de nivel y caminos) como de tipo raster (ortofotos) que fue utilizada corresponde a las cartas topográficas del *INEGI* en escala 1 : 50,000 de las siguientes áreas:

1. **Ayutla de los Libres** (E14C59)
2. **Colotepec** (E14C49)
3. **Copala** (E14D61)
4. **Cruz Grande** (E14C69)
5. **Iliatenco** (E14D41)
6. **Llano de las Puertas** (E14C68)
7. **Mazatlán** (E14C38)
8. **Metlatonoc** (E14D42)
9. **Potoichán** (E14D31)
10. **Pueblo Hidalgo** (E14D52)
11. **Quechultenango** (E14C39)
12. **San Luis Acatlán** (E14D51)
13. **San Marcos** (E14C58)
14. **Tierra Colorada** (E14C4851)
15. **Xalpatlahuac** (E14D32)

Los datos estructurales y de litología corresponden a lo reportado por el *Servicio Geológico Mexicano* en sus cartas escala 1:250,000 de “*Acapulco*” (E14-11) y “*Chilpancingo*” (E14-8). Además, se utilizó un *Modelo Digital de Elevación (MDE)* con una resolución de 12 metros que fue generado por el *Instituto de Geografía* para el proyecto del cual deriva este trabajo de tesis. Finalmente, se consideró la sismicidad de la zona, por lo que se consultaron los catálogos del *Servicio Sismológico Nacional (SSN)* y del *Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)*.

Posteriormente y una vez concluido el análisis con los SIG, se identificaron rasgos lineales sobre el terreno. Una vez mapeadas dichas estructuras se procedió a seleccionar los puntos que parecieron más representativos o que tuvieran un alto potencial para contener o mostrar evidencia de fallamiento. Las estaciones seleccionadas fueron verificadas en un viaje de campo (el cual se realizó como segunda fase de este trabajo).

4.1. Análisis de las formas de relieve

A lo largo de esta sección se explicará cada una de las herramientas que, cuyo análisis en conjunto, ayudó en la identificación lineamientos en nuestra área de estudio. Como ya se mencionó, por la naturaleza del objetivo del proyecto nos enfocamos en identificar estructuras con un sentido Este - Oeste. En la Fig. 4.1 es posible observar los insumos que fueron utilizados.

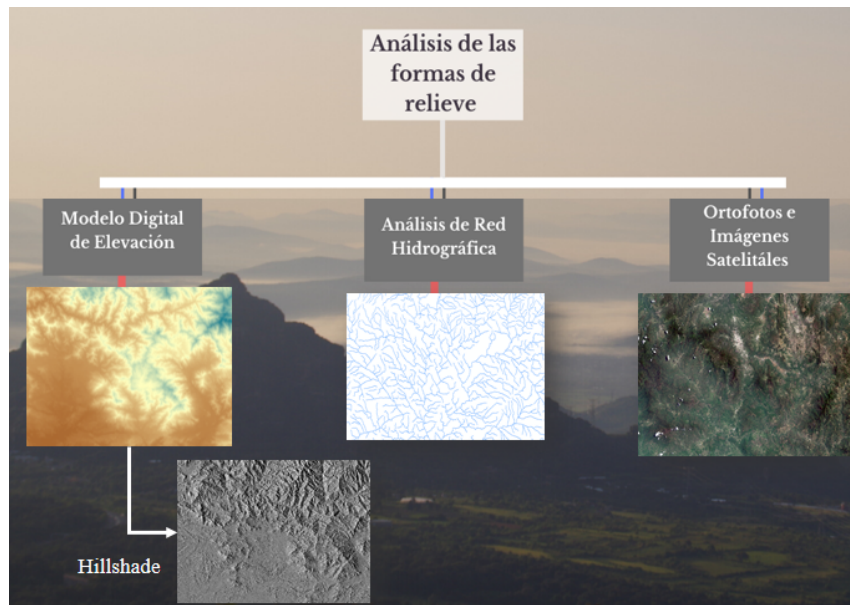


Figura 4.1: Metodología utilizada en el análisis del relieve.

4.1.1. Modelo digital de elevación

Utilizando el Modelo digital de elevación (MDE) de nuestra área de estudio y con la herramienta *3D Analyst Tools* de ArcMap se construyeron cuatro diferentes *Hillshade* o mapas de sombras del terreno (ver las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5) con el objetivo de resaltar los atributos en la morfología de nuestra área de estudio (como lineamientos, valles, pendientes pronunciadas, entre otros).

Para la creación de estos mapas se simularon diferentes posiciones del sol (azimut) con una elevación (altitud) constante sobre nuestro terreno igual a 45° .

Aunque a simple vista las diferencias entre los diferentes modelos no son muchas, en un análisis a detalle de cada mapa se resaltan atributos que pudieran no ser observados en los otros (lo cual es un efecto generado por la variación de la posición simulada del sol). De aquí la importancia de utilizar íntegramente cada una de las fuentes de información que se exponen en este capítulo.

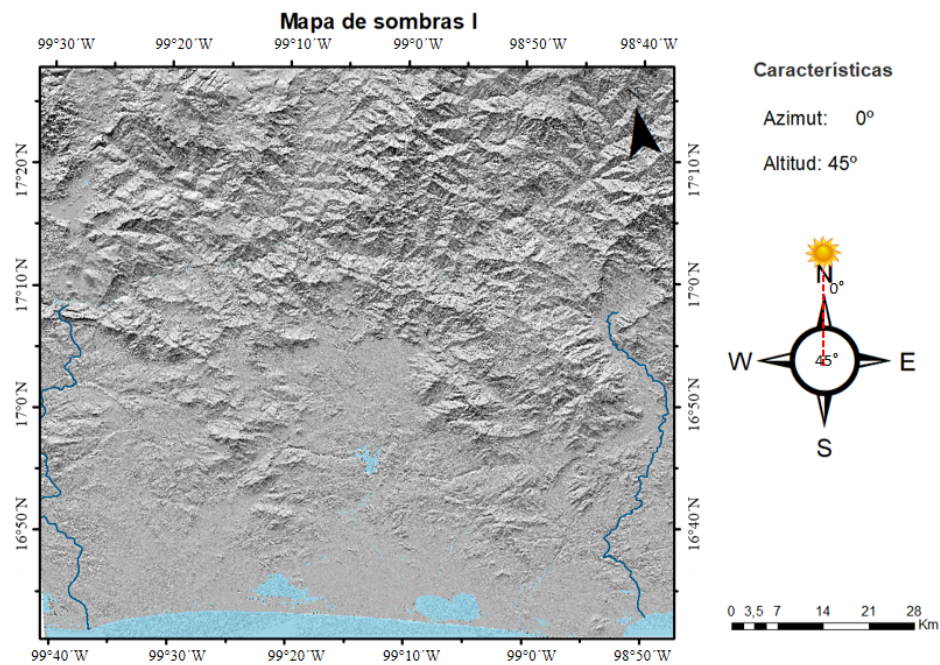


Figura 4.2: Mapa de sombras I: azimut 0° y altitud 45°

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

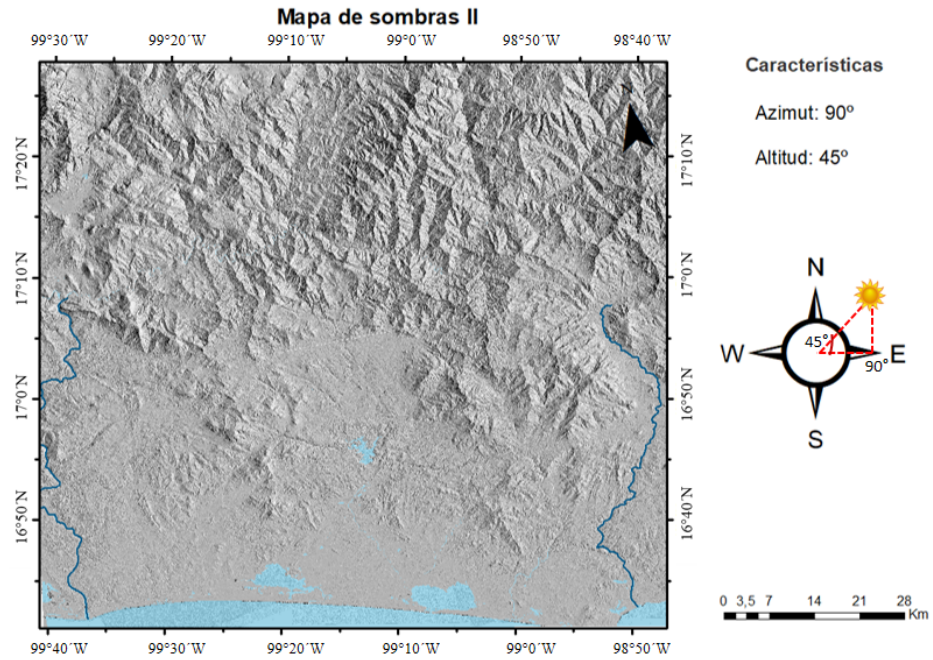


Figura 4.3: Mapa de sombras II: azimut 90° y altitud 45°

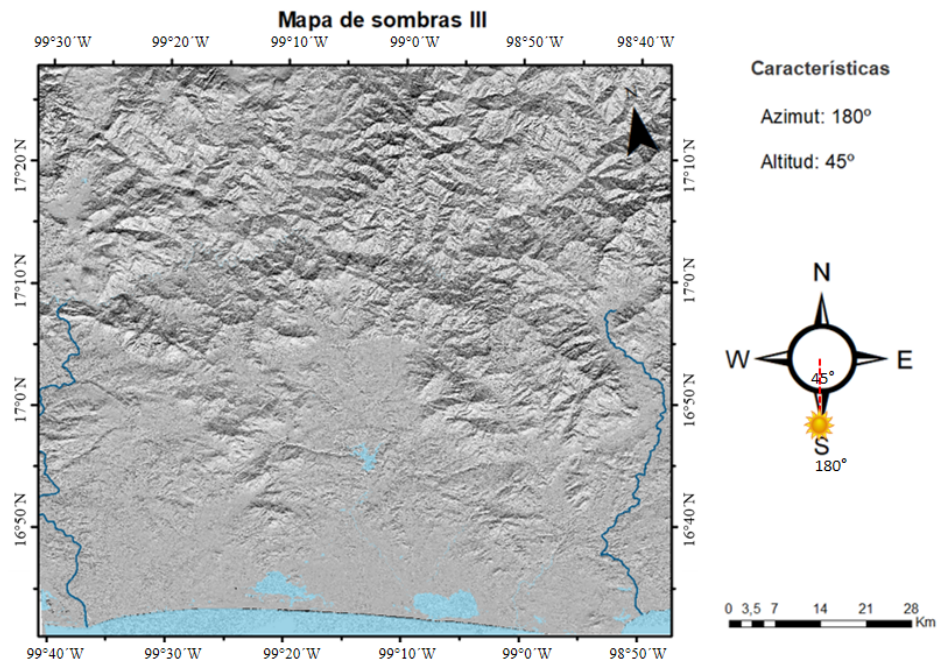


Figura 4.4: Mapa de sombras III: azimut 180° y altitud 45°

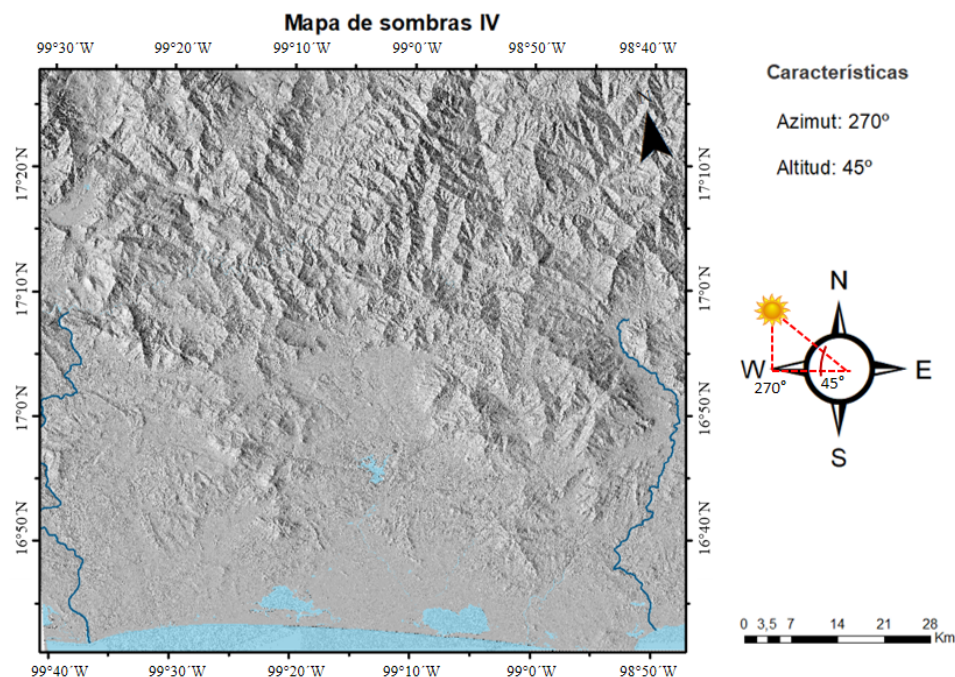


Figura 4.5: Mapa de sombras IV: azimut 270° y altitud 45°

Muchos de los lineamientos que fueron trazados sobre los diferentes mapas de sombras coincidieron en 2 o más de los *hillshades*. Aquellos trazos que solo fueron visibles en un solo mapa se analizaron a detalle junto con el patrón de drenaje y el mapa de litología para descartar aquellos que no estuvieran asociados a un control tectónico. Los lineamientos finales marcados sobre los mapas de sombras se muestran en la figura 5.3 del *Capítulo 5*.

4.1.2. Análisis de la red hidrográfica

El análisis de la red de drenaje puede ser una herramienta muy importante para nuestro estudio, pues los ríos pueden llegar a ser muy sensibles a los cambios en el relieve causados tanto por procesos tectónicos como cambios litológicos. El patrón de drenaje ayudó a identificar tendencias lineales y desviaciones en las corrientes. También es importante recordar que en muchos de los casos las corriente ayudan a acceder al registro litológico, pues a su paso suelen dejar al descubierto los cuerpos rocosos sobre los que podemos encontrar evidencias como estrías o fracturas.

4.1.3. Ortofotos e imágenes satelitales

Aunque en menor medida, ortofotos e imágenes satelitales (de Landsat 8) fueron utilizadas para ayudarnos a trazar muchos de los lineamientos más evidentes, así como para identificar pendientes pronunciadas o cambios litológicos. Al realizar las combinaciones entre las diferentes bandas que componen la imagen Landsat 8 pudimos analizar rasgos o materiales en específico en función de su espectro de emisión, lo cual ayuda a discriminar entre los diversos elementos que componen la imagen (ver Fig. 4.6). Las combinaciones utilizadas en este trabajo fueron las siguientes:

Combinación de bandas (Franco, 2017)	
No. de Banda	Atributo remarcado
5 , 3 , 4	Cuerpos de agua
6 , 7 , 4	Falso color (zonas urbanas, cuerpos rocosos)
7 , 4 , 2	Geología (elementos geológicos)
4 , 3 , 2	Color Natural

Tabla 4.1: Combinación de bandas, Landsat 8

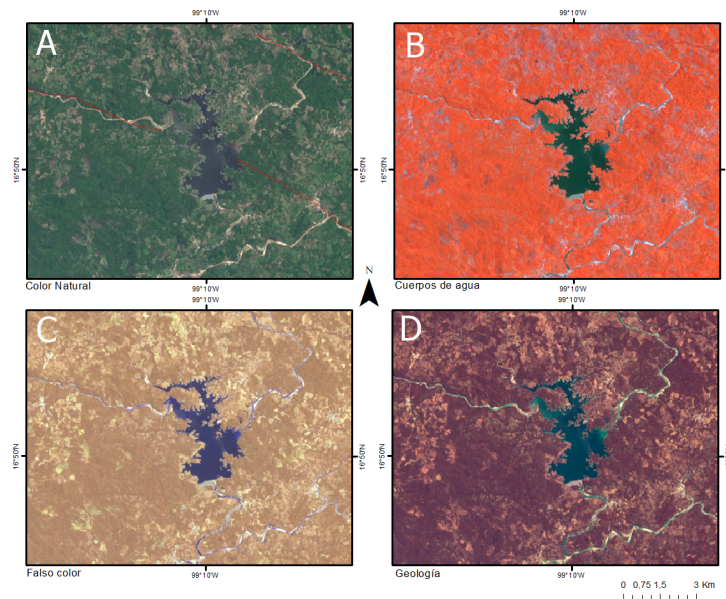


Figura 4.6: Combinación de bandas en imágenes satelitales Landsat 8: A) color natural (bandas 432), B) cuerpos de agua (bandas 534), C) falso color (bandas 674) y D) geología (bandas 742).

La resolución de 2 metros de las ortofotos (ver Fig. 4.7) fue de gran ayuda para la identificación y discriminación de familias de fracturas y/o diaclásas.

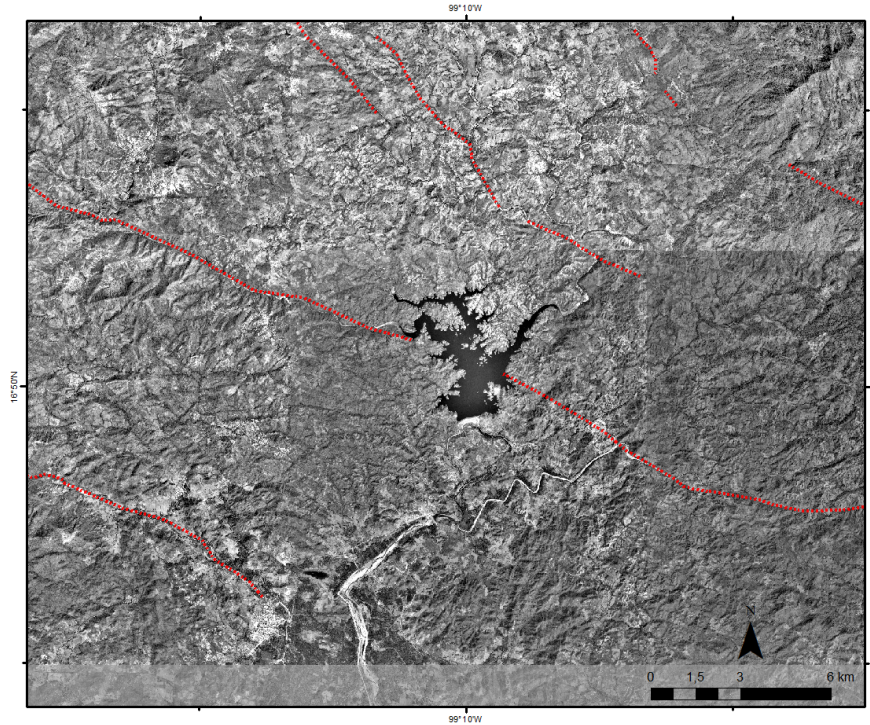


Figura 4.7: Ejemplo de Ortofoto utilizada para el análisis del relieve. Las líneas rojas punteadas corresponden a lineamientos marcados

4.2. Análisis de la actividad sísmica del área

Dentro de este estudio consideramos la actividad sísmica ocurrida en la región con el objetivo de identificar zonas cercanas a nuestros lineamientos que mostraran una actividad sísmica recurrente o de importancia. Para lo anterior se consultaron los catálogos de sismos del *Servicio Sismológico Nacional (SSN)* y el del *Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)*. Es importante mencionar que la fuente de información más robusta en este rubro fue el SSN, pues a pesar de contar con un periodo de registro desde 1990 tiene registrada una mayor cantidad de eventos para esta región que el USGS, el cual tiene una base que data desde 1956.

4.3. Trabajo de Campo

Una vez realizado el análisis de la información con los *SIG* y teniendo identificados los lineamientos se procedió a seleccionar los puntos de mayor interés para verificarlos en campo. Los criterios utilizados para la selección de estos puntos fueron los siguientes:

1. Existencia de rasgos en las formas de relieve que indicaran la ocurrencia de fallas (como valles lineales, ríos desviados, pendientes abruptas, entre otros).
2. Con las imágenes satelitales se identificaron zonas que pudieran tener cuerpos rocosos expuestos (como ríos, barrancas, cortes de carretera...).
3. Se buscaron áreas propensas a la acumulación de sedimentos recientes con la finalidad de realizar trincheras (como en los cauces del río, terrazas, etc.)
4. Se consideró también la coincidencia entre las estructuras que marcamos contra las reportadas por el *Servicio Geológico Mexicano*.
5. Sitios accesibles.

Con la información analizada y los criterios ya mencionados, se escogieron tres áreas para verificación en campo (la cual tuvo una duración de 4 días). Se visitaron las estaciones en búsqueda de evidencia de ocurrencia de fallas en los cuerpos rocosos (como indicadores cinemáticos) y en el relieve, además, algunas trincheras fueron realizadas con el objetivo de buscar afectaciones o cambios en el depósito de sedimentos recientes.

Capítulo 5

Resultados

De forma general dividimos en dos partes el trabajo que se realizó en esta investigación, la primera fase consistió en la documentación y análisis de información de sensores remotos (principalmente). Posteriormente se acudió a campo para corroborar o descartar las estructuras de interés que fueron marcadas.

5.1. Lineamientos Identificados

Como herramientas e insumos principales se utilizaron los modelos de sombras de terreno y las imágenes satelitales de *Google Earth* con un factor de exageración en la elevación igual a 3. Una ventaja considerable de usar *Google Earth* fue que al aplicar una exageración en la elevación y al tener la posibilidad de ver imágenes históricas pudimos confirmar o descartar la existencia de algunos lineamientos marcados. Además, las imágenes históricas nos permitieron analizar una misma área en diferentes condiciones climáticas, ya sea con vegetación abundante (poniendo en evidencia árboles o plantas alineados) o en sequía (lo cual nos mostró algunas de las formas de relieve ocultas).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de la *red hidrográfica* de nuestra área jugó un papel muy importante. En general el patrón de drenaje observado tiende a ser dendrítico, sin embargo hay algunas regiones donde se puede encontrar un patrón paralelo (ver Fig. 5.1). Además, muchos de los lineamientos marcados coinciden con los causes de los ríos, lo cual en campo puede significar una gran ventaja debido a que las corrientes nos ayudan a dejar al descubierto las rocas (lo que facilita la búsqueda de evidencia sobre los afloramientos). Los primeros trazos de lineamientos que se marcaron fueron hechos únicamente considerando el patrón de drenaje. Fueron marcados ríos que tuvieran una tendencia lineal sin importar su extensión, continuidad o buzamiento (ver Fig. 5.2).

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

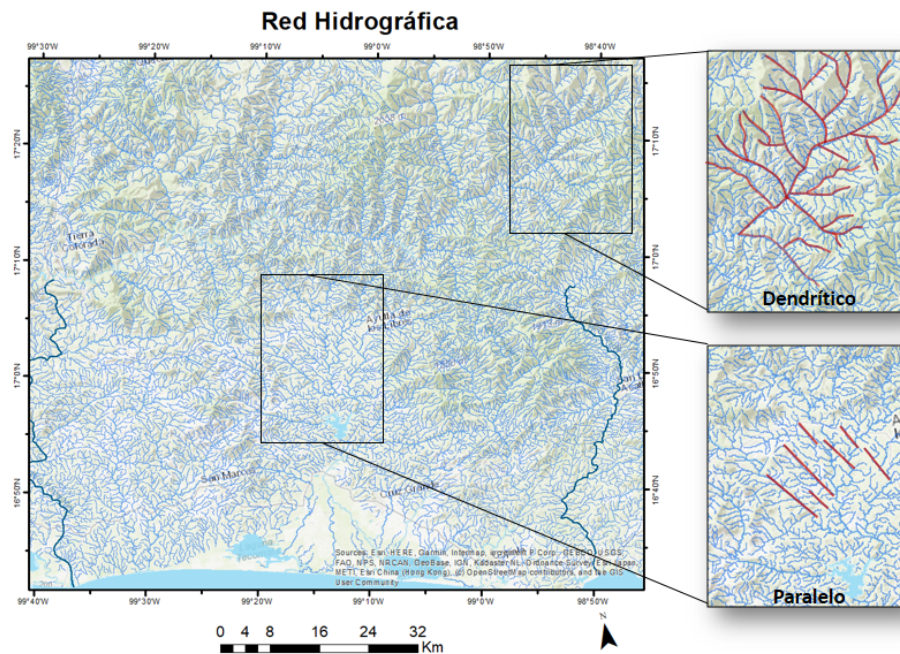


Figura 5.1: Red hidrográfica de la zona estudiada. En la imagen se resalta tanto un ejemplo de patrón dendrítico como otro paralelo. Elaborado con ArcMap, 2019.

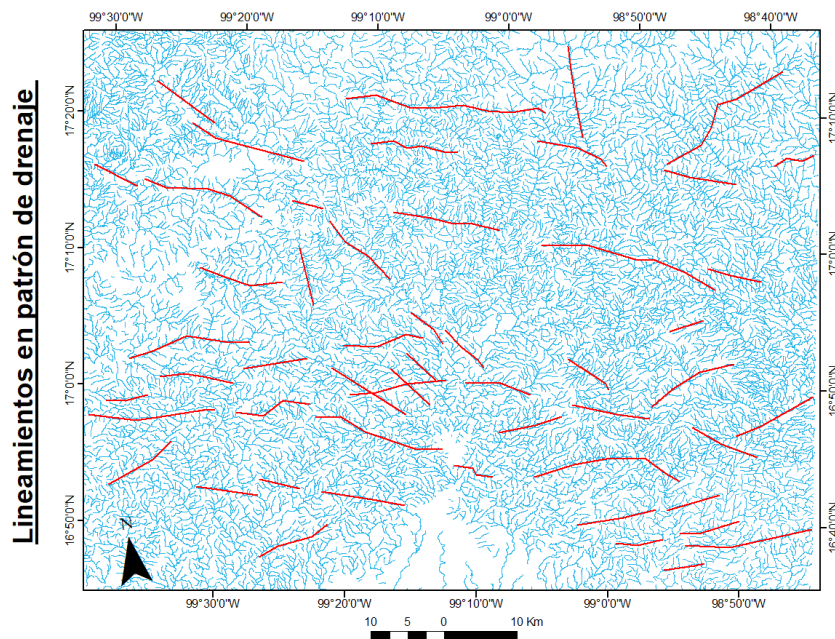


Figura 5.2: Lineamientos trazados sobre el patrón de drenaje. Elaborado con ArcMap, 2019.

Posteriormente se utilizaron los mapas de sombras e imágenes satelitales para la identificación de estructuras lineales en el relieve (Ver Fig. 5.3).

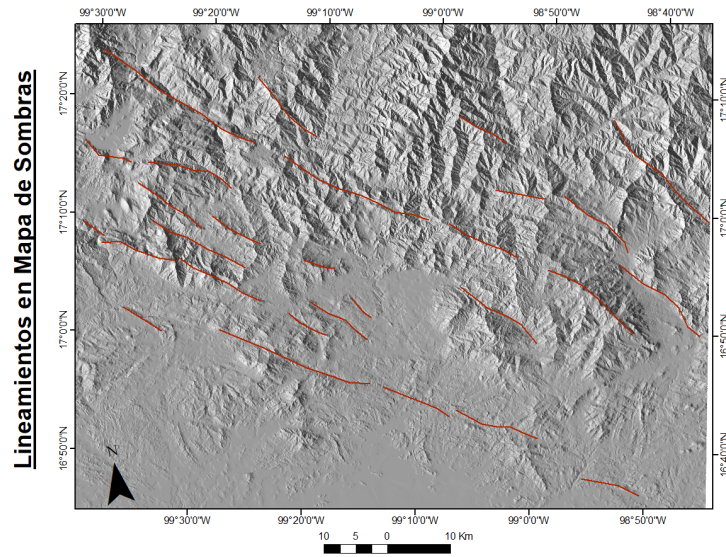


Figura 5.3: Lineamientos trazados sobre los mapas de sombras. Elaborado con ArcMap,2019.

Todos los lineamientos que se marcaron durante el análisis individual de cada insumo se muestran en la Fig. 5.4.

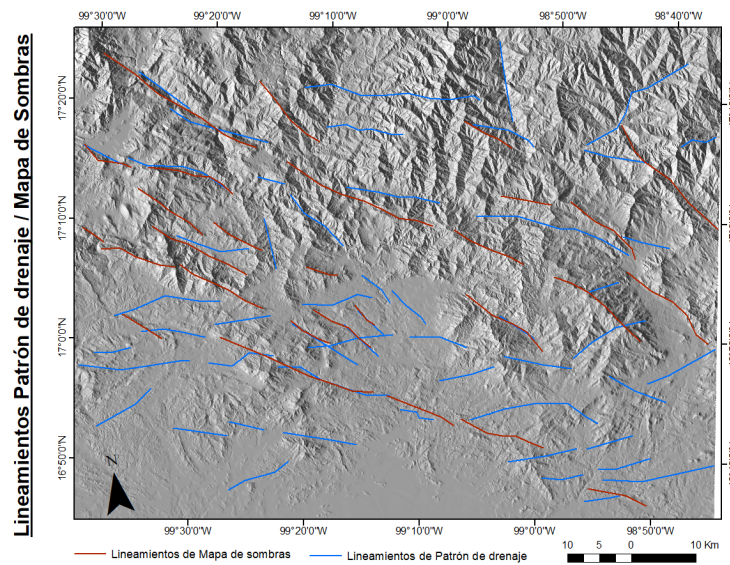


Figura 5.4: Lineamientos trazados sobre los mapas de sombras (líneas rojas) y el patrón de drenaje (líneas azules). Elaborado con ArcMap,2019.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

Una vez que marcados los lineamientos se corroboraron con ayuda de los mapas litológicos con el objetivo de descartar aquellos que pudieran estar influenciados por el tipo de roca o contactos entre ellas. El mapa geológico junto con los lineamientos se puede observar en la Figura 5.15. Cercano a estas posibles fallas se realizó una observación a detalle con la finalidad de buscar rasgos que indicaran la ocurrencia de fallamiento, por ejemplo, uno de los causas más grandes con tendencia lineal que se encontraron se muestra en el mapa de sombras (Fig. 5.5), donde se puede observar claramente como el cauce tiene tendencia recta por aproximadamente 8 km y un sentido WNW-ESE. Al observar la misma zona pero en una imagen satelital de Google Earth (Fig. 5.6) se puede constatar que el río corre a través de un pequeño valle lineal, el cual según Wallace (1990) puede ser una forma de relieve asociada a la presencia de fallas laterales (Ver Capítulo 2.3).

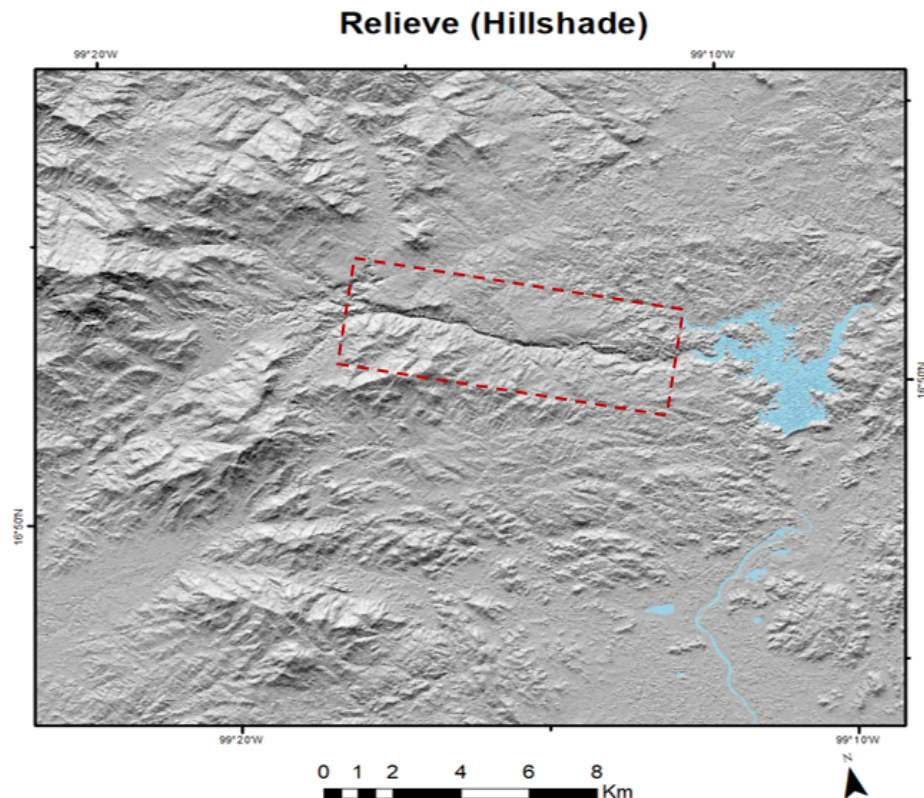


Figura 5.5: Análisis de relieve con mapas de sombras de terreno. En el rectángulo de color rojo se resalta un río con tendencia lineal. Elaborado con ArcMap, 2019

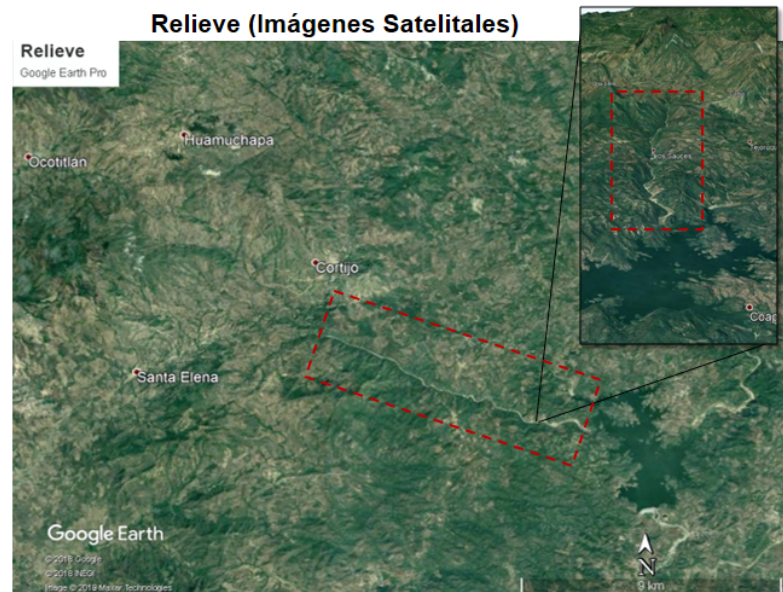


Figura 5.6: Análisis de relieve con imágenes satelitales. En el rectángulo de color rojo se resalta un río con tendencia lineal. Elaborado con Google Earth Pro (2019)

Algunas otras evidencias importantes que encontramos se muestran a continuación:

1. **Ríos Desviados:** la desviación de las corrientes de los ríos puede ser un indicador muy claro de desplazamiento horizontal. Cuando una falla lateral interseca un río se observará una pequeña variación en la dirección del flujo. Ouchi (2005) menciona que para que la desviación de la corriente se mantenga, la falla debe intersecar perpendicularmente (o casi) a la corriente, ya que de otro modo el flujo del río tomará la dirección del plano de falla.



Figura 5.7: Evidencia: ríos desviados. Elaborado con Google Earth Pro (2019).

- Ríos lineales:** a diferencia de como sucede con los ríos desviados, se puede observar que las corrientes tienden a fluir de forma lineal cuando éstas han sido capturadas a lo largo del desplazamiento horizontal de una falla *strike-slip* (Ouchi, 2005).

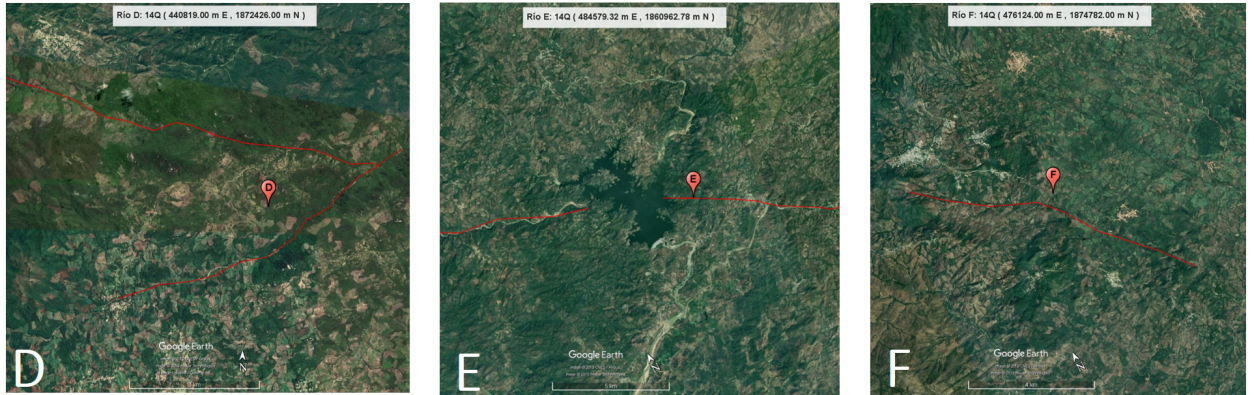


Figura 5.8: Evidencia: ríos lineales. Elaborado con Google Earth Pro (2019).

- Valles lineales:** a lo largo de un plano de falla los cuerpos rocosos se vuelven más susceptibles a los diversos agentes de intemperismo, por lo que una falla favorecerá la creación de valles que seguirán la tendencia de dicho plano (Sloan, 2006).

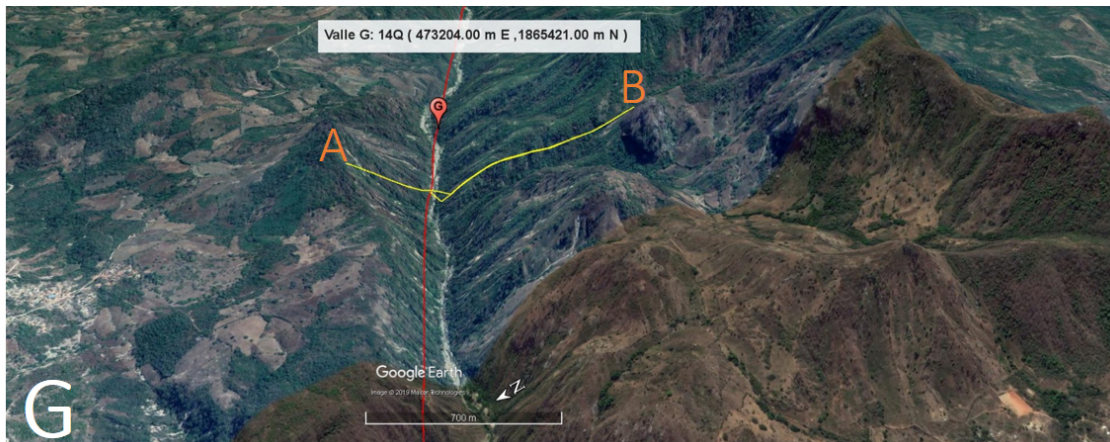


Figura 5.9: Evidencia: valles lineales. Elaborado con Google Earth Pro (2019).

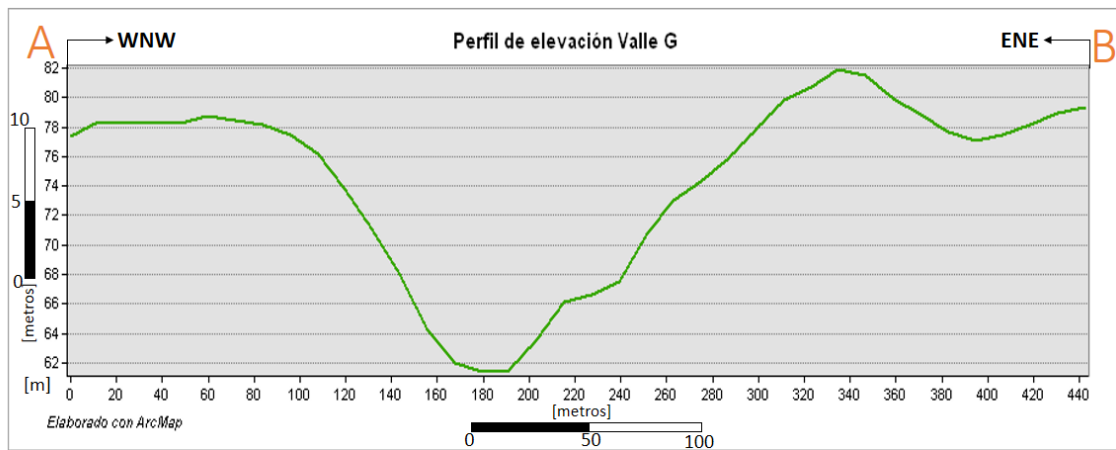


Figura 5.10: Perfil de elevación del valle mostrado en la Fig. 5.9. Elaborado con ArcMap, 2019.

4. Otros

Como otras posibles evidencias fueron considerados aspectos como la aparente desviación de un parte aguas (Fig. 5.11) o la alineación de la vegetación, pues una falla puede comportarse como un canal permeable que suministra agua a las plantas o árboles de la zona, por lo que su crecimiento tenderá a concentrarse de forma lineal (Fig. 5.12).

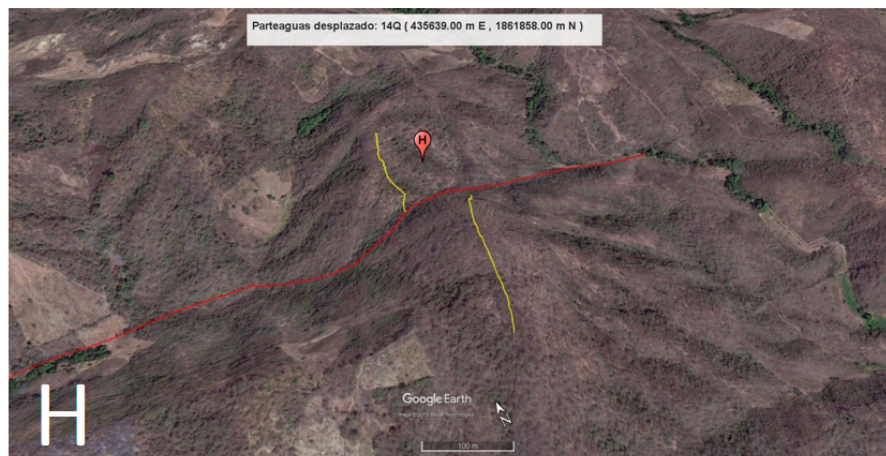


Figura 5.11: Evidencia: parteaguas desplazado. Elaborado con Google Earth Pro (2019).



Figura 5.12: Evidencia: vegetación alineada. Elaborado con Google Earth Pro (2019).

Es importante mencionar que al comienzo de este trabajo (durante la fase de documentación) se consultaron las cartas geológicas a escala 1:250, 000 de Chilpancingo (E14-8) y de Acapulco (E-14-11) tanto del INEGI como del SGM. La principal diferencia entre éstas radica en la distribución de las litologías y la ubicación de sus contactos, además también es posible encontrar diferencias en las diversas estructuras reportadas como lo son fallas y fracturas. Por la cantidad de información y detalle disponible en sus cartas (útil para cumplir los objetivos de este trabajo) decidimos utilizar como fuente de consulta al *Servicio Geológico Mexicano (SGM)*.

Al empezar a marcar los lineamientos se evitó analizar a detalle las fallas y fracturas de las cartas del SGM, esto con la finalidad de tener un punto de control de calidad sobre las estructuras que en este trabajo se interpretaron. Una vez obtenidos los lineamientos de nuestro análisis los comparamos con las estructuras publicadas en las cartas. Muchas de esas estructuras coinciden en gran medida, sin embargo hay algunas de importancia para este trabajo que el SGM reporta pero que no pudimos observar en nuestro MDE o en las imágenes satelitales (para ver la comparación entre los lineamientos referirse a la Fig. 5.16). De igual forma hubo algunos lineamientos menores que pudimos ver pero que el SGM no reporta. Lo anterior y la coincidencia entre las estructuras marcadas en este trabajo y las reportadas por ellos fue un factor que se consideró para seleccionar nuestros puntos de verificación en campo.

Los informes técnicos de las cartas mencionadas fueron revisados con la finalidad de encontrar los puntos de verificación del SGM, pero los únicos que se especifican son aquellos donde se realizó un muestreo Geoquímico, por lo que otro factor para nuestra verificación en campo fue la selección de fallas con interpretación de movimiento (como sucede con las fallas laterales que ellos reportan). Finalmente en las Figuras 5.13 y 5.14 se muestran en color rojo los lineamientos que fueron marcados después de nuestro análisis.

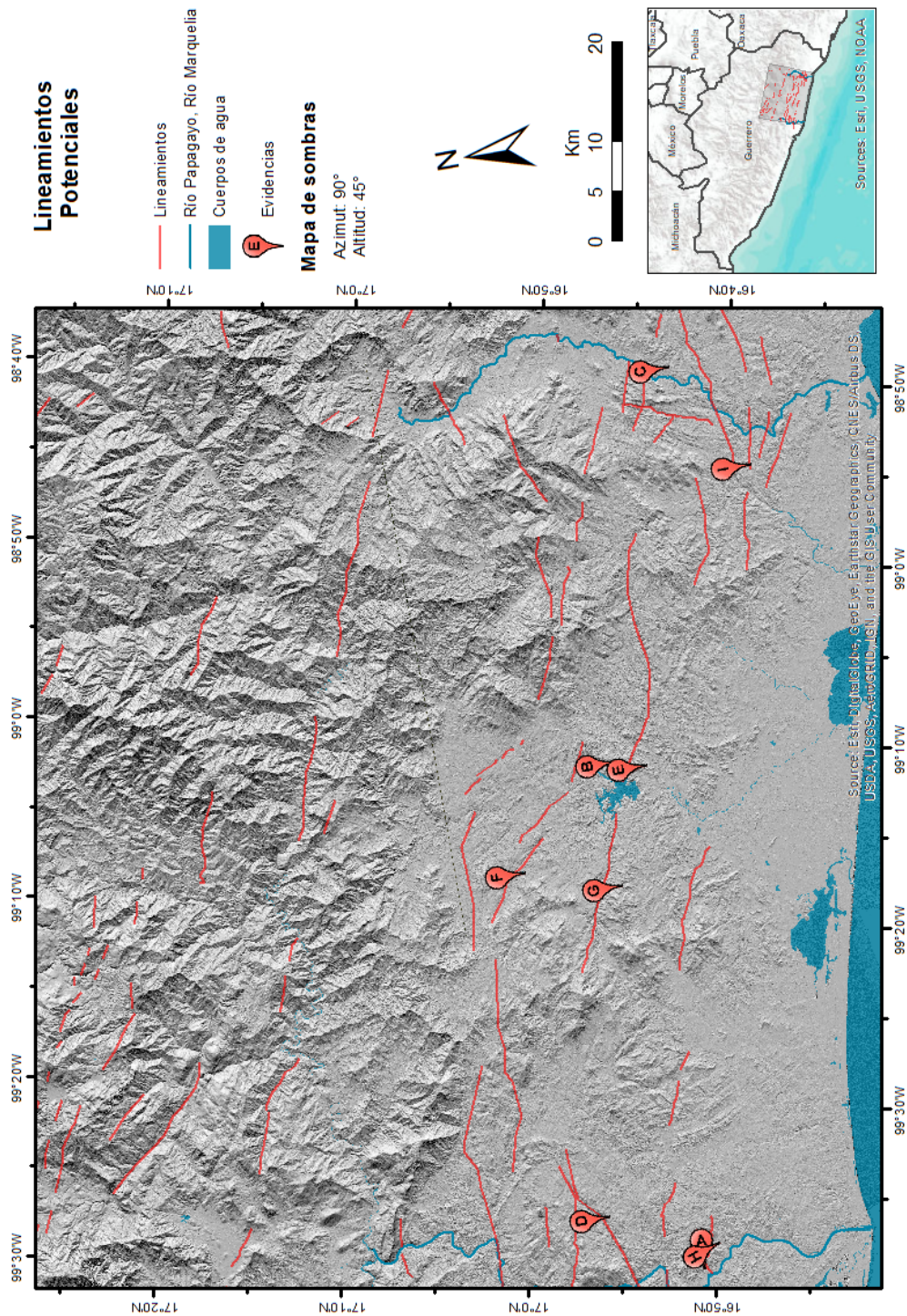


Figura 5.13: Lineamientos marcados en el mapa de sombras. Las evidencias que se indican en el mapa son: ríos desviados (A,B y C), ríos lineales (D,E y F), valle lineal (G), parteaguas desviado (H) y vegetación alineada (I). Elaborado con ArcMap, 2019.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

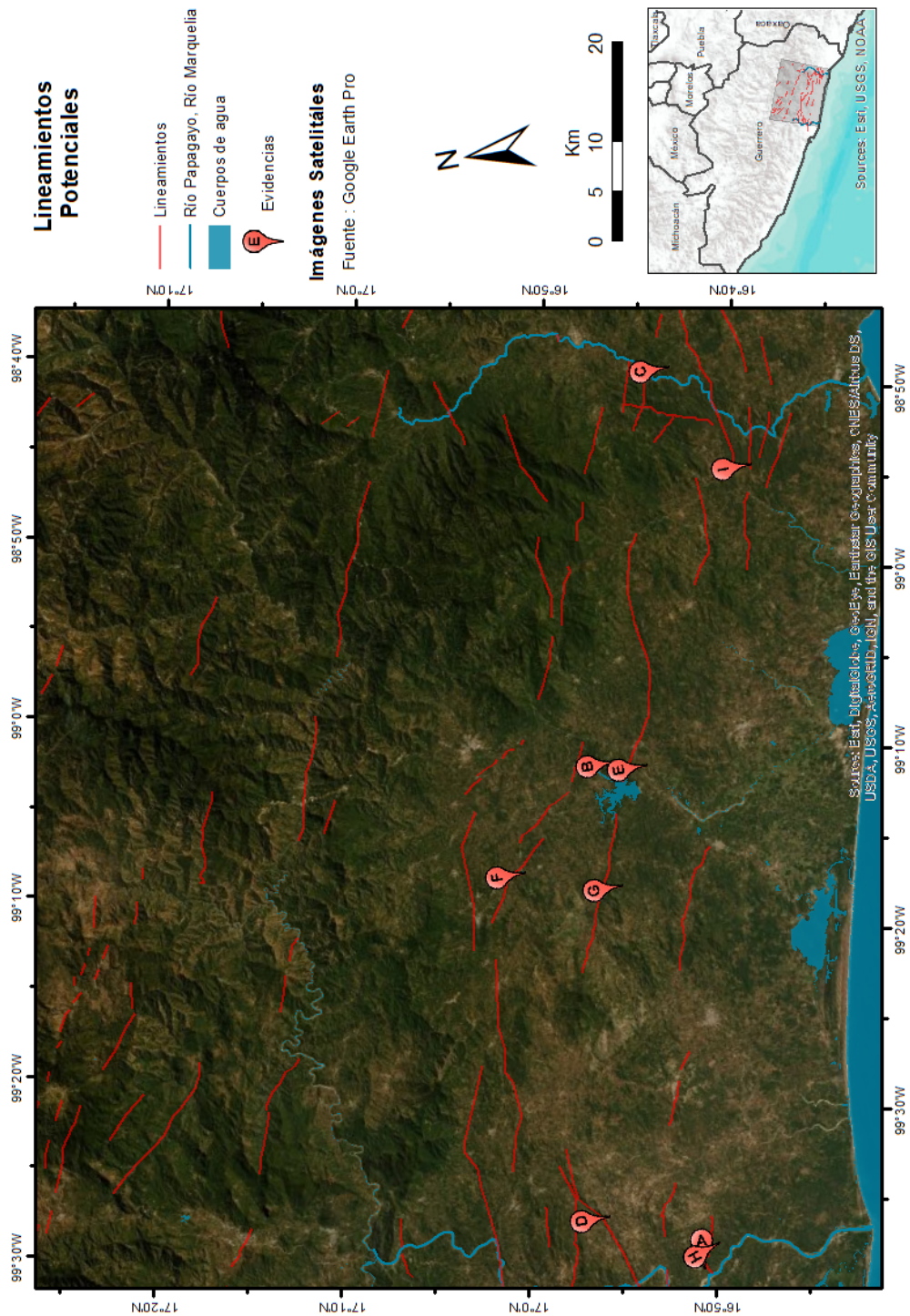


Figura 5.14: Lineamientos vistos con imágenes satelitales. Las evidencias que se indican en el mapa son: ríos desviados (A,B y C), ríos lineales (D,E y F), valle lineal (G), parteaguas desviado (H) y vegetación alineada (I). Elaborado con ArcMap, 2019.

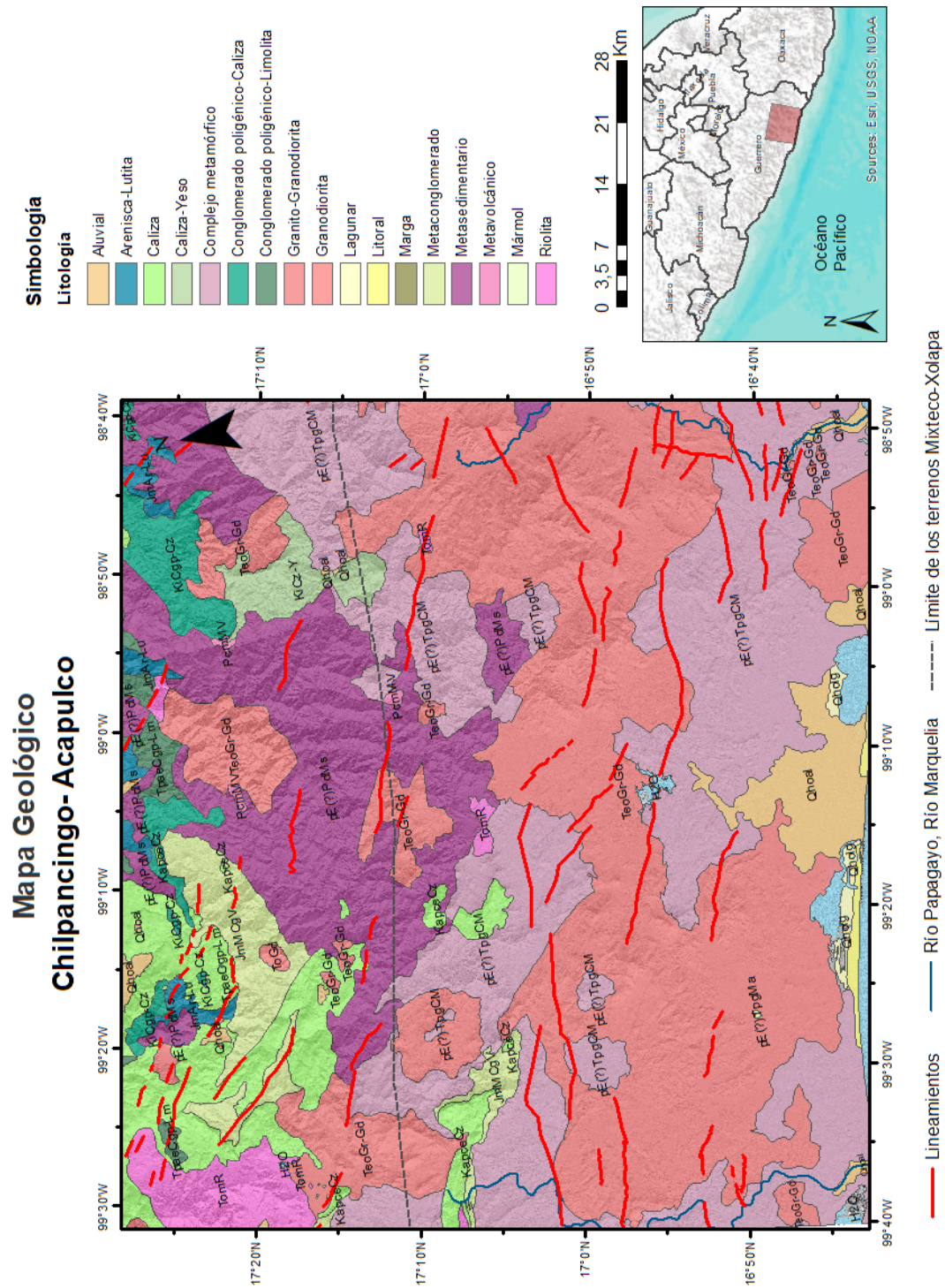


Figura 5.15: Lineamientos marcados sobre el mapa litológico del *Servicio Geológico Mexicano*. Elaborado con ArcMap, 2019.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

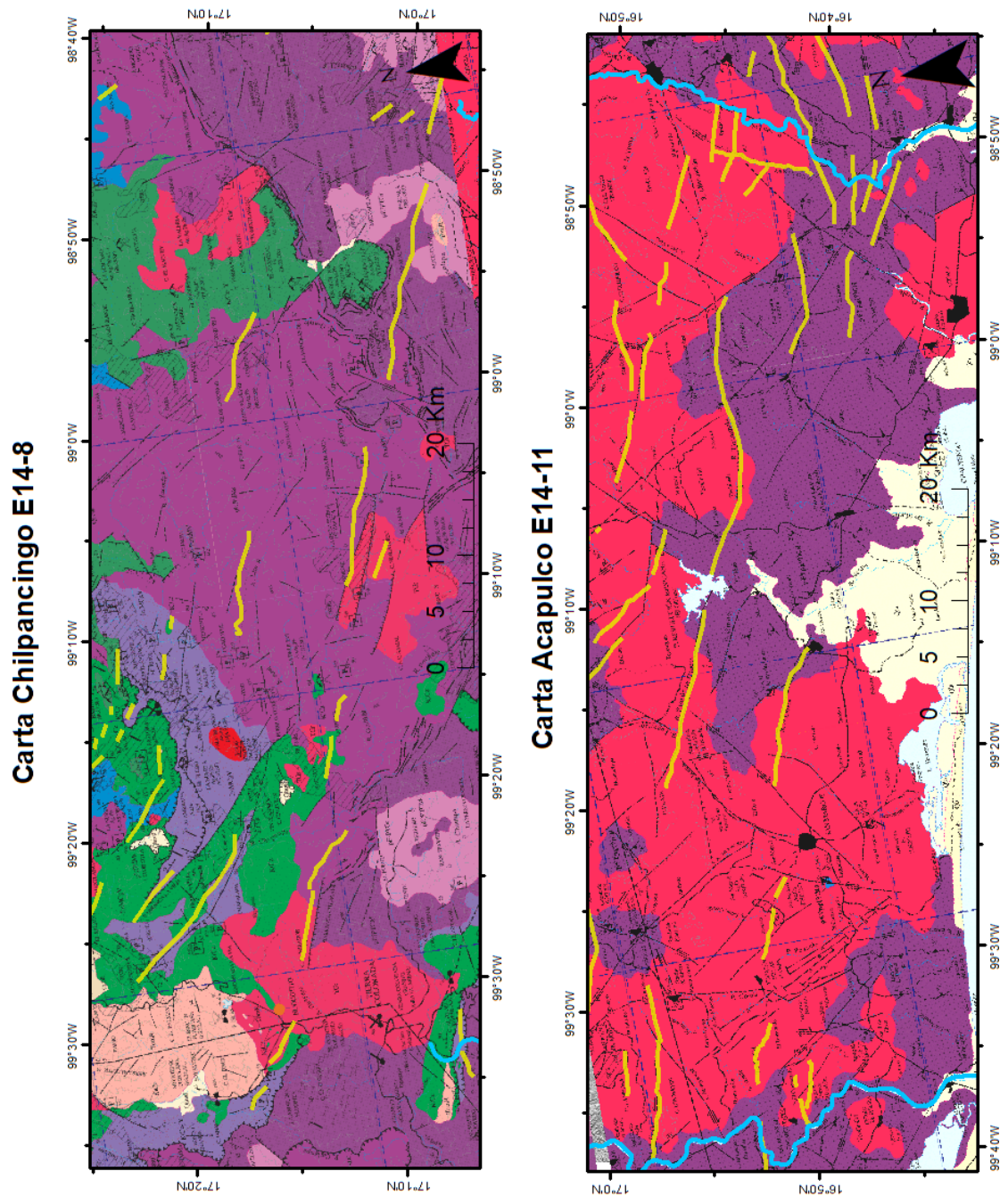


Figura 5.16: Lineamientos trazados (amarillos) vs lineamientos del SGM (datos estructurales en color negro). Elaborado con ArcMap, 2019.

5.2. Resultados de Campo

La verificación de los lineamientos en campo se realizó a lo largo de 4 días, por lo tanto y en función de la evidencia recabada en la primera fase de estudio, escogimos 3 áreas para visitar. Las estaciones y puntos a explorar se nombraron de la siguiente manera:

Estaciones de campo	
<i>La Intersección</i>	<i>Coordenadas</i>
Parada 1-I:	14Q (437821.82 m E, 1874117.55 m N)
Parada 1-II:	14Q (442640.06 m E, 1873427.48 m N)
Parada 1-III:	14Q (442872.10 m E, 1873429.13 m N)
Parada 1-IV:	14Q (443209.36 m E, 1873447.40 m N)
Parada 1-V:	14Q (443222.40 m E, 1873402.35 m N)
Parada 1-VI:	14Q (443268.32 m E, 1873400.62 m N)
Parada 1-VII:	14Q (443137.51 m E, 1873204.07 m N)
<i>La Presa</i>	<i>Coordenadas</i>
Parada 2-I:	14Q (486132.00 m E, 1865661.24 m N)
Parada 2-II:	14Q (486631.20 m E, 1865373.31 m N)
Parada 2-III:	14Q (486227.50 m E, 1864984.31 m N)
Parada 2-IV:	14Q (486249.07 m E, 1864124.18 m N)
Parada 2-V:	14Q (485400.54 m E, 1863683.22 m N)
Parada 2-VI:	14Q (482351.39 m E, 1868860.23 m N)
Parada 2-VII:	14Q (475969.09 m E, 1864021.16 m N)
<i>La Tercia</i>	<i>Coordenadas</i>
Parada 3-I:	14Q (435564.03 m E, 1861753.47 m N)
Parada 3-II:	14Q (436063.33 m E, 1861839.81 m N)
Parada 3-III:	14Q (436919.34 m E, 1861841.87 m N)
Parada 3-IV:	14Q (436699.18 m E, 1860763.70 m N)

Tabla 5.1: Coordenadas de las estaciones de campo

En la Fig. 5.17 se pueden observar las paradas de cada estación, así como la ruta que se siguió.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

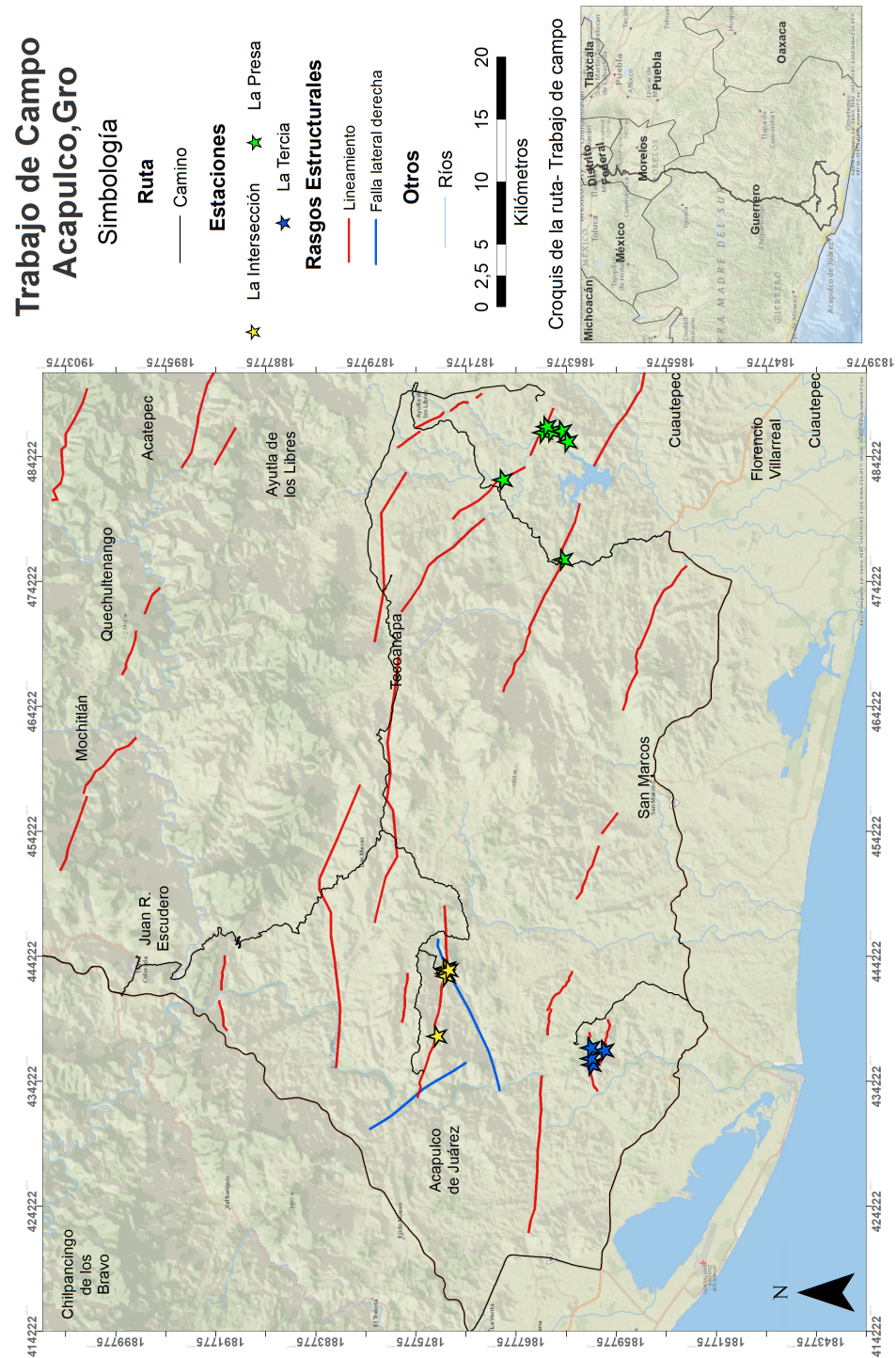


Figura 5.17: Mapa general de verificación de campo. La línea de color negro señala la ruta que se siguió en campo, las líneas rojas son lineamientos trazados, las azules son fallas laterales derechas reportadas por el SGM y las estrellas indican las estaciones visitadas. Elaborado con ArcMap (2019).

5.2.1. Estación La Intersección

En este punto hay dos ríos con tendencia lineal que se encuentran intersecándose como se observa en el mapa de la Fig. 5.18, además, ahí se señalan los puntos visitados, así como los lugares donde se tomaron las fotografías que aquí se presentarán como evidencia. De acuerdo con la interpretación del SGM estos lineamientos corresponde a una falla del tipo *lateral derecha* y otra *lateral izquierda* (marcados en color azul y rojo respectivamente). En las cartas del SGM se establece que la falla lateral izquierda esta siendo cortada por la falla lateral derecha, por lo que podemos establecer que ésta última es un evento más reciente. La estructura en color rojo tiene una longitud aproximada de 10.2 km mientras que la marcada en color azul se extiende por al rededor de 13.5 km.

Las rocas que encontramos corresponden a un granito con un grado de meteorización que va de moderado a alto. Pueden observarse cristales gruesos de cuarzo, feldespatos y biotita. En algunas áreas se ve la presencia de lo que pudiera ser óxidos de fierro.

Al realizar el recorrido sobre el cauce del río que corresponde a la falla lateral derecha (según la interpretación del SGM) encontramos indicadores cinemáticos que nos sugieren la ocurrencia de un movimiento lateral izquierdo (ver Fig. 5.19) y no dextral como es reportado en la carta E-14-11. Los datos estructurales que se midieron en esta falla son los siguientes:

1. Dirección de buzamiento del plano de falla: 315/62
2. Actitud de las estrías: 234/15

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

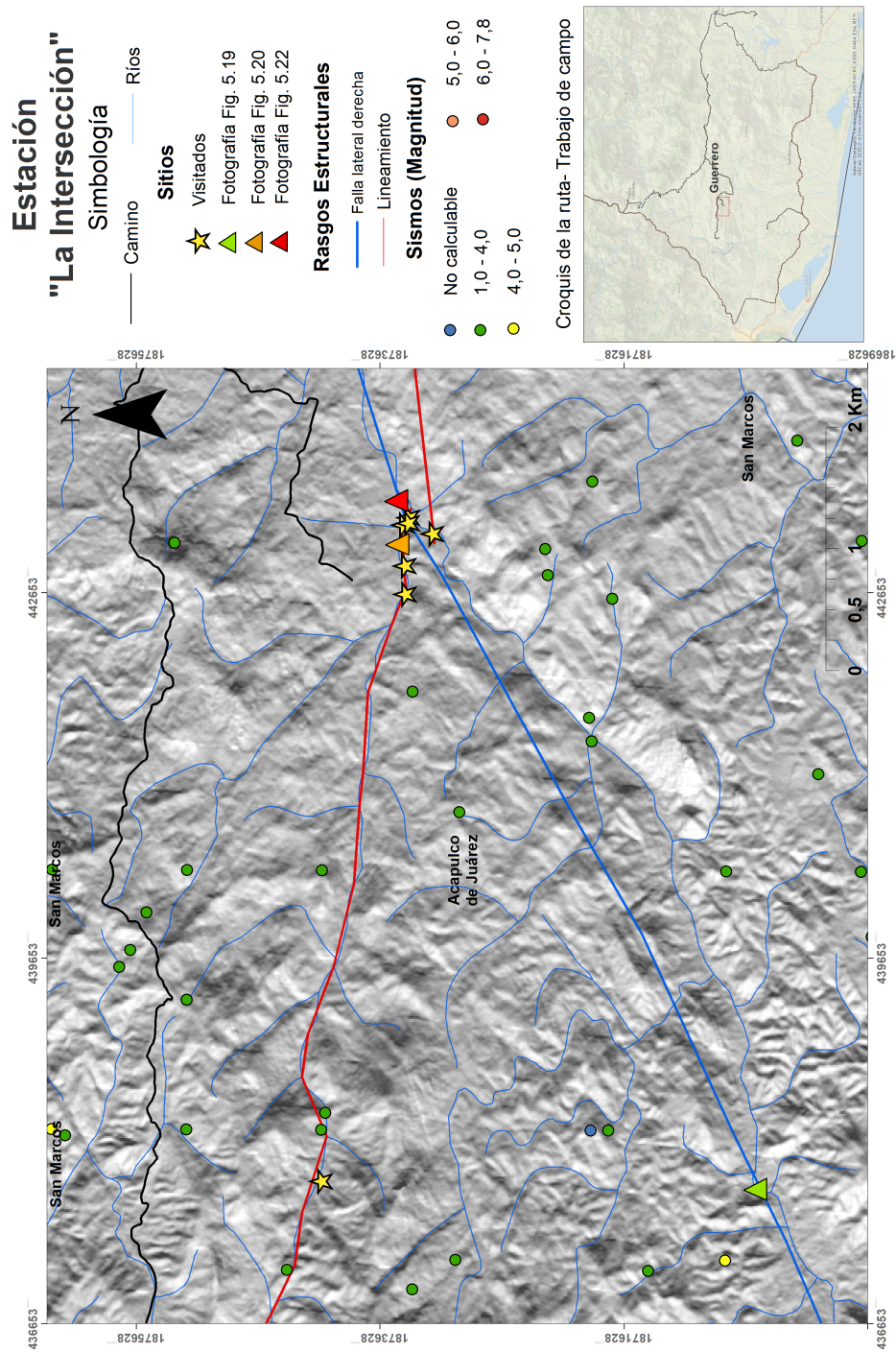


Figura 5.18: Mapa de la estación “La Intersección”. Los sismos fueron consultados en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional (2019), las profundidades de los hipocentros se encuentran por arriba de los 17-38 km de profundidad. Elaborado con ArcMap, 2019.

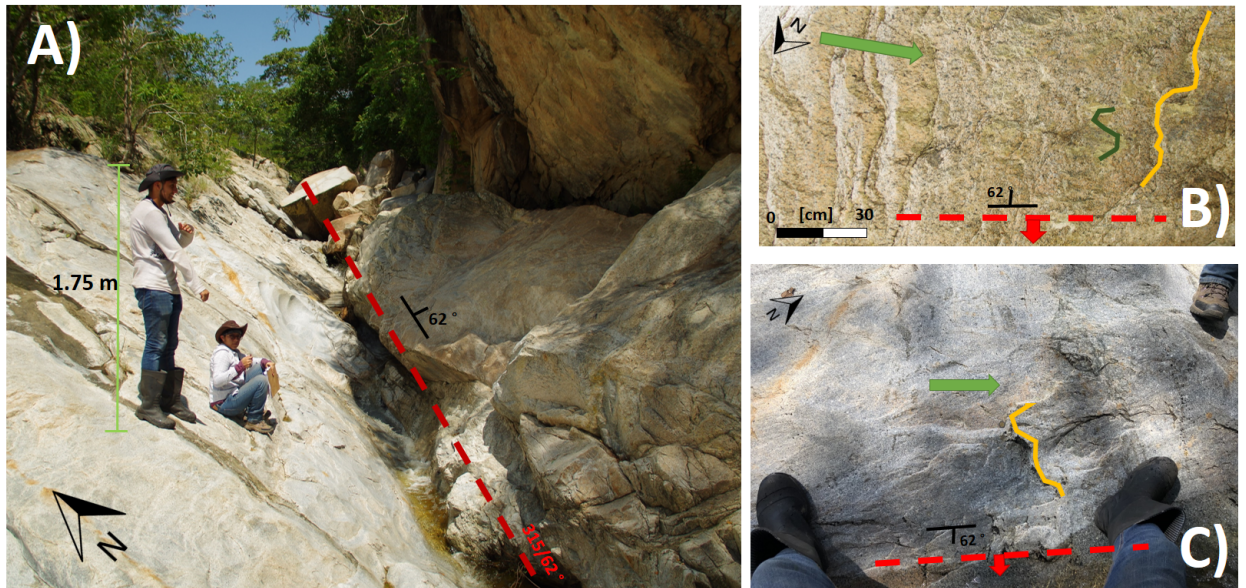


Figura 5.19: Evidencia en estación La Intersección: A) Cauce del río (la línea roja punteada indica la dirección donde se encuentra el plano de falla 315/62) B) y C) Indicadores cinemáticos (las líneas rojas punteadas indican la dirección hacia donde se encuentra el plano de falla, las líneas amarillas señalan los indicadores tipo fracturas riedel o conocidos también como *cuñas* y las flechas verdes indican el sentido de movimiento del bloque ausente). Octubre del 2019.

Por otro lado, sobre la falla lateral izquierda (de acuerdo a la carta del *SGM*) pudimos corroborar la existencia de indicadores asociados a un movimiento sinistral y que tienen una componente normal (ver Fig. 5.20). Los datos estructurales para esta discontinuidad se muestran a continuación:

1. Dirección del buzamiento del plano de falla: 180/30
2. Actitud de las estrías: 264/02



Figura 5.20: Evidencia de estación La Intersección: falla lateral izquierda. La línea roja punteada señala el plano de falla, la línea amarilla el indicador tipo fractura riedel (o *cuña*) y la flecha verde indican el sentido del movimiento del bloque ausente. Octubre del 2019.

En la Fig. 5.21 se pueden ver las proyecciones estereográficas tanto de la falla lateral izquierda como de la "derecha".

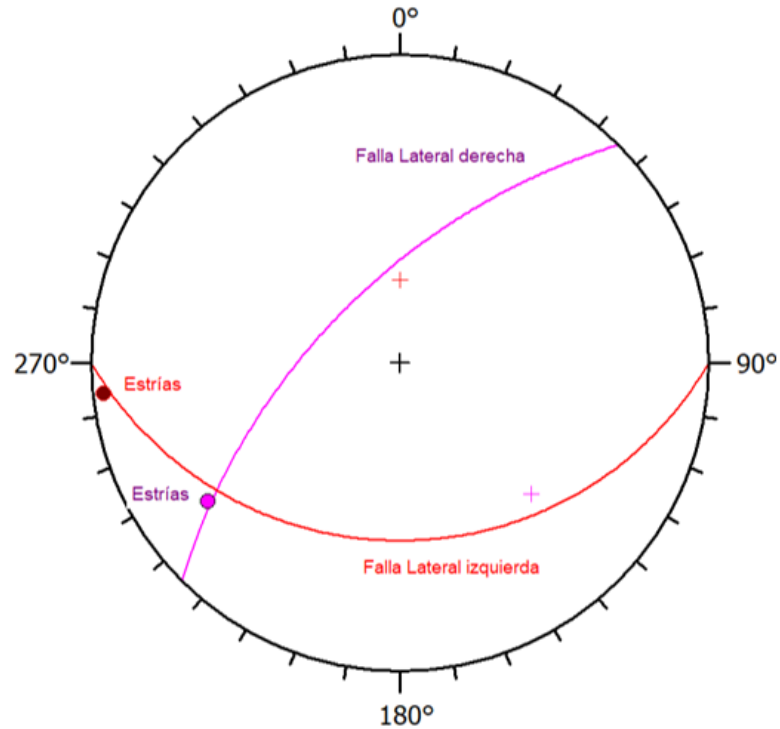


Figura 5.21: Actitud de los planos de falla y estrías. Elaborado con Stereo32, 2019.

Al continuar el caminamiento aguas abajo sobre la falla lateral que nosotros interpretamos como izquierda, encontramos otra falla que la intersecta con la siguiente orientación:

1. Dirección del buzamiento del Plano de falla: 120/49
2. Actitud de las estrías: 035/05

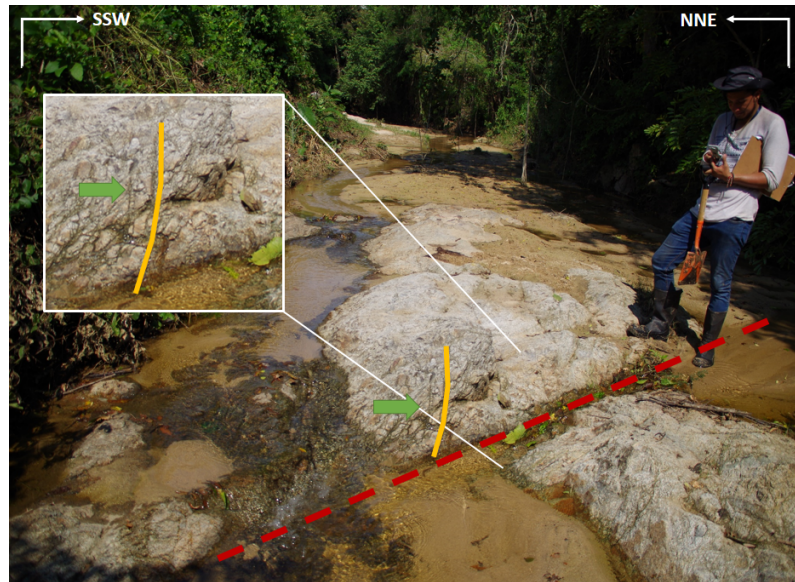


Figura 5.22: Evidencia de estación La Intersección. La línea roja punteada señala el plano de falla, la línea amarilla el indicador tipo fractura riedel (o *cuña*) y la flecha verde indican el sentido del movimiento del bloque ausente. Octubre del 2019.

La proyección en la red estereográfica es la siguiente:

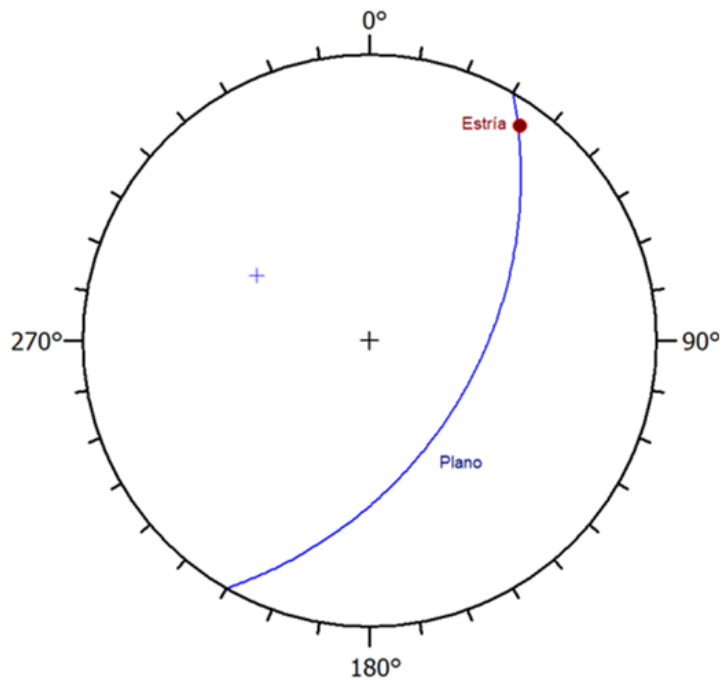


Figura 5.23: Actitud del plano de falla y estrías. Elaborado con Stereo32, 2019.

El análisis de indicadores cinemáticos nos sugiere que el movimiento corresponde a una falla lateral izquierda y cuyo ángulo de intersección con la falla principal es de aproximadamente 10.5° (ver Fig. 5.24). Por lo anterior podemos suponer que esta última estructura encontrada puede tratarse de una falla secundaria asociada a la primera estructura (ver "Comportamiento de fallas strike-slip" en el Capítulo 2.3).

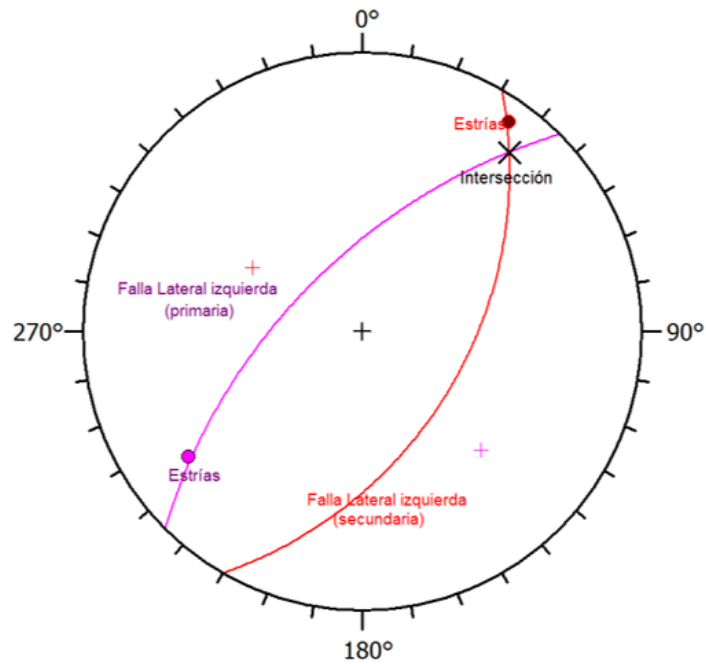


Figura 5.24: Intersección entre falla principal y secundaria. Elaborado con Stereo32, 2019.

5.2.2. Estación La Presa

Debido a las malas condiciones climáticas que prevalecieron en esta región durante la temporada en la que realizamos la visita, solo se pudo visitar la parada “2-VII”, pues cerca de la zona de la presa “*El Guineo*” se registraron deslizamientos (lo cual dificultaba el acceso a las paradas programadas en esta estación). Es importante mencionar que este lugar era de gran interés por las inflexiones mostradas en el río (ver Fig. 5.7 B). Además, dos de las fallas más grandes reportadas (con longitudes entre 16 y 24 km aproximadamente) se encuentran en esta zona.

La estación 2-VII está ubicada dentro de uno de estos grandes lineamientos (Ver Fig. 5.25), en ella pudimos observar cuerpos de tonalitas con abundantes fracturas (lo cual sugiere que estamos en una área que ha sido sometida a diferentes procesos de deformación y fracturamiento). Sobre las estrías que encontramos pudimos observar la presencia de epidota en los espacios vacíos (*zonas de sombra*), que de acuerdo a Doblas (1998) corresponden a un indicador cinemático tipo *escalón* con *fibras de cristales*, y que se consideran como uno de los indicadores más confiables para conocer el sentido de movimiento en una falla.

Los datos estructurales medidos de las fallas (Fig 5.26 A) y las estrías rellenas con lo que parece ser epidota (Fig 5.26 B) se muestran a continuación:

1. Dirección del buzamiento del plano de fractura: 02/85
2. Actitud de las estrías: 91/5

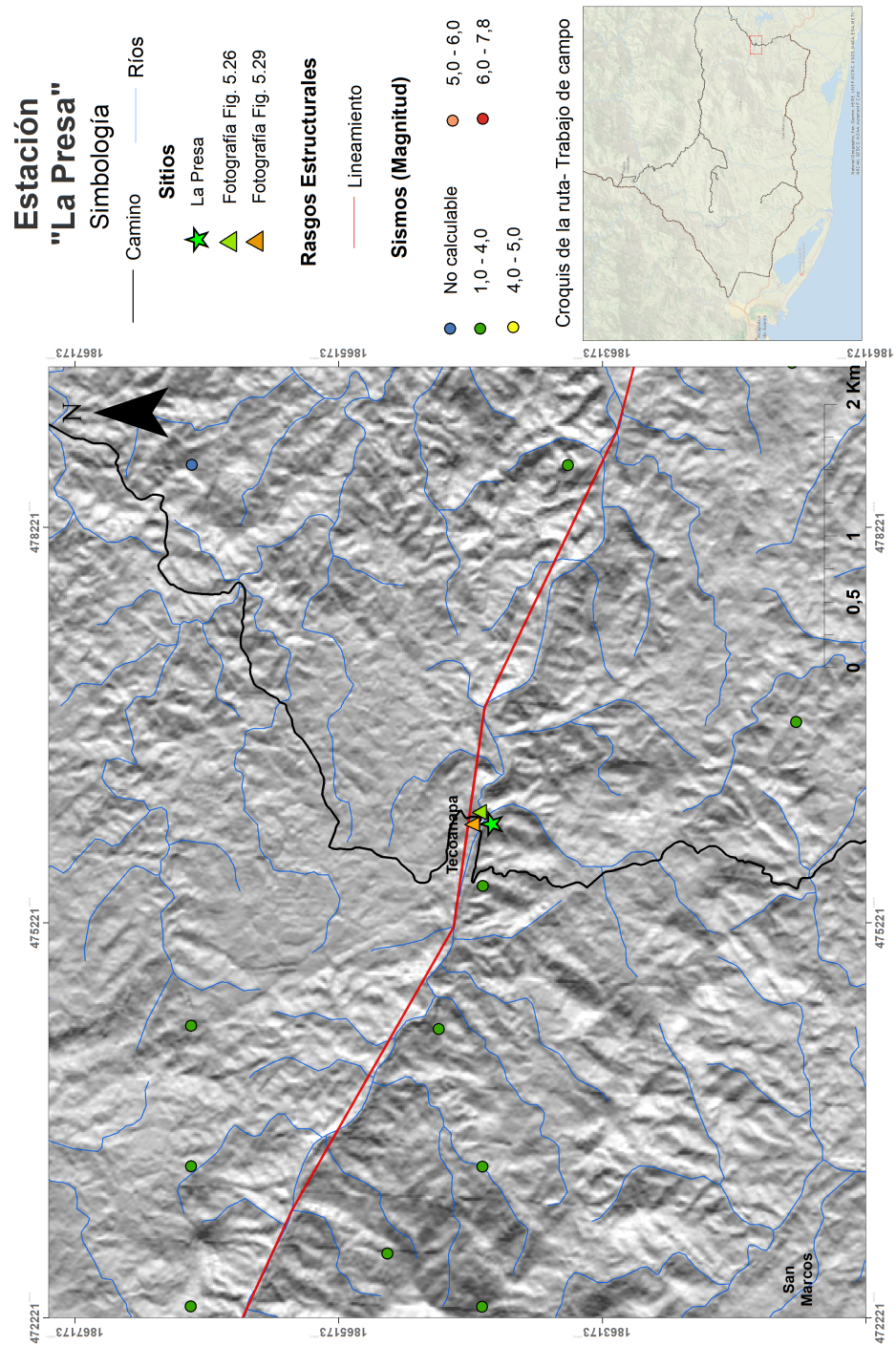


Figura 5.25: Mapa de la estación “La Presa”. Los sismos fueron consultados en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional (2019), las profundidades de los hipocentros se encuentran por arriba de los 17-38 km de profundidad. Elaborado con ArcMap, 2019.

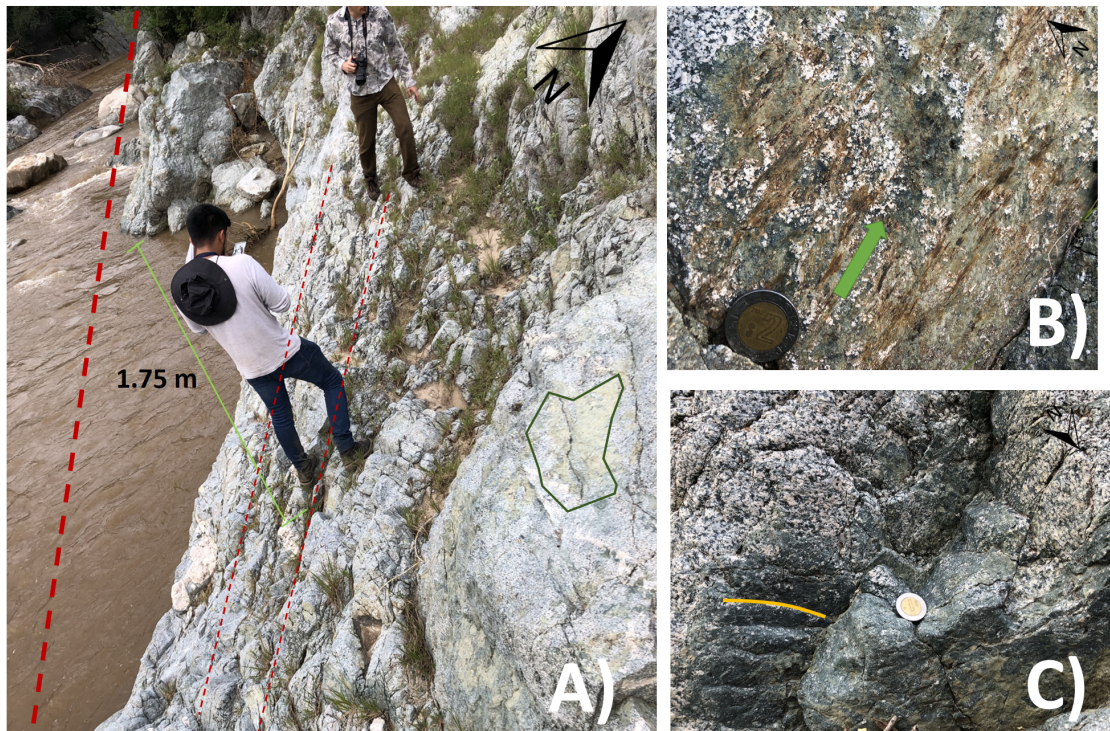


Figura 5.26: Evidencia de estación La Presa: A) Cauce del río (las líneas rojas punteadas señalan los planos de falla y la línea verde muestra la presencia de epidota sobre las zonas de sombra) B) Indicadores tipo escalón con fibras de cristales (la flecha de color verde indica el sentido de movimiento del bloque ausente) C) Estructuras tipo Riedel (la línea amarilla señala estructuras tipo Riedel shears). Octubre del 2019.

Las proyecciones de las fallas y sus indicadores mostrados en la Fig. 5.26 A y B es la siguiente:

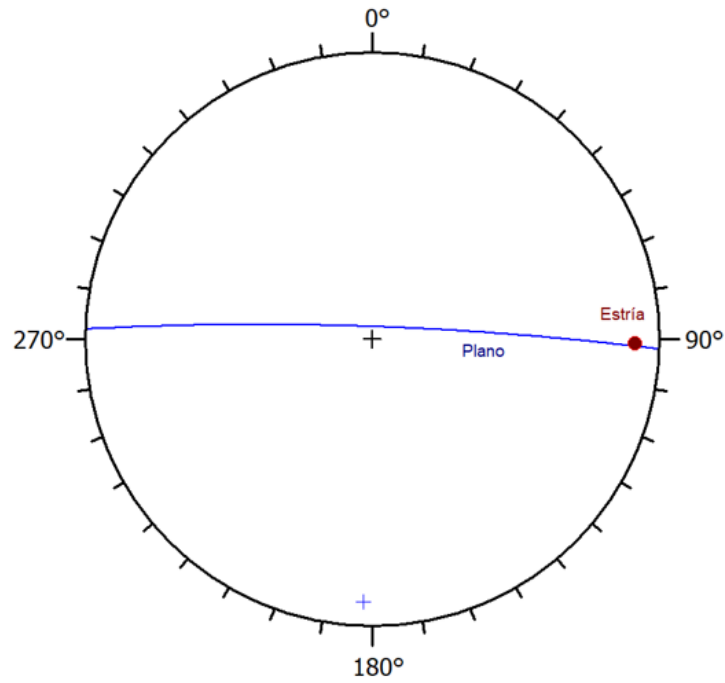


Figura 5.27: Actitud del plano de falla y estrías. Elaborado con Stereo32, 2019.

En otros indicadores cinemáticos encontrados (ver Fig. 5.26 C) se pudo observar un sentido de movimiento lateral izquierdo con una componente inversa y, que por el estado de conservación en el que se encuentran, se podría pensar que se trata de un evento más antiguo respecto a los otros movimientos identificados. Los datos estructurales medidos fueron los siguientes:

1. Dirección de buzamiento del Plano de Fractura: 154/65
2. Carácter de las estrías: 230/30

Y que resultan en la siguiente proyección:

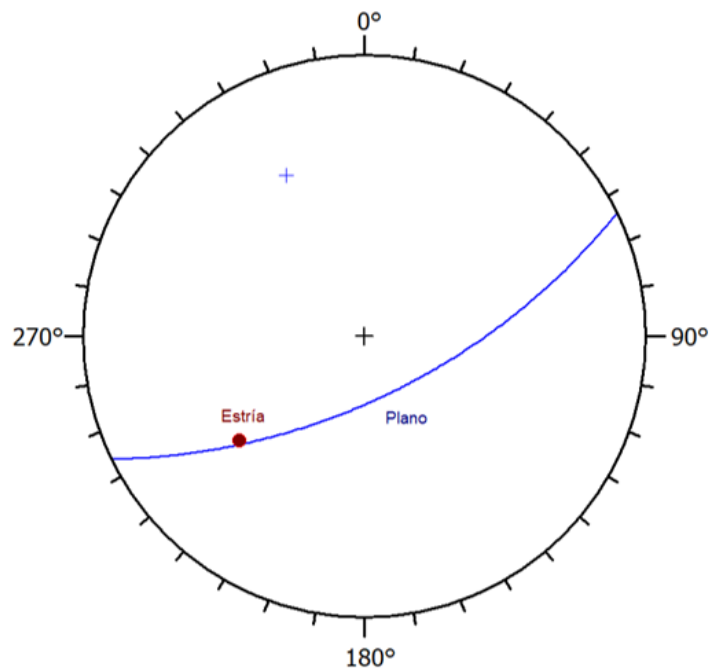


Figura 5.28: Actitud del plano de falla y estrías. Elaborado con Stereo32, 2019.

Finalmente y en concordancia con lo visto en el afloramiento, las formas del relieve que se encuentran alrededor de la traza de la falla principal están aproximadamente a un mismo nivel topográfico, lo cual puede ser un indicio de que uno de los últimos eventos que pudo haber afectado esta región fue un desplazamiento lateral, ya que no hay afectaciones evidentes de variaciones verticales (ver Fig. 5.29).

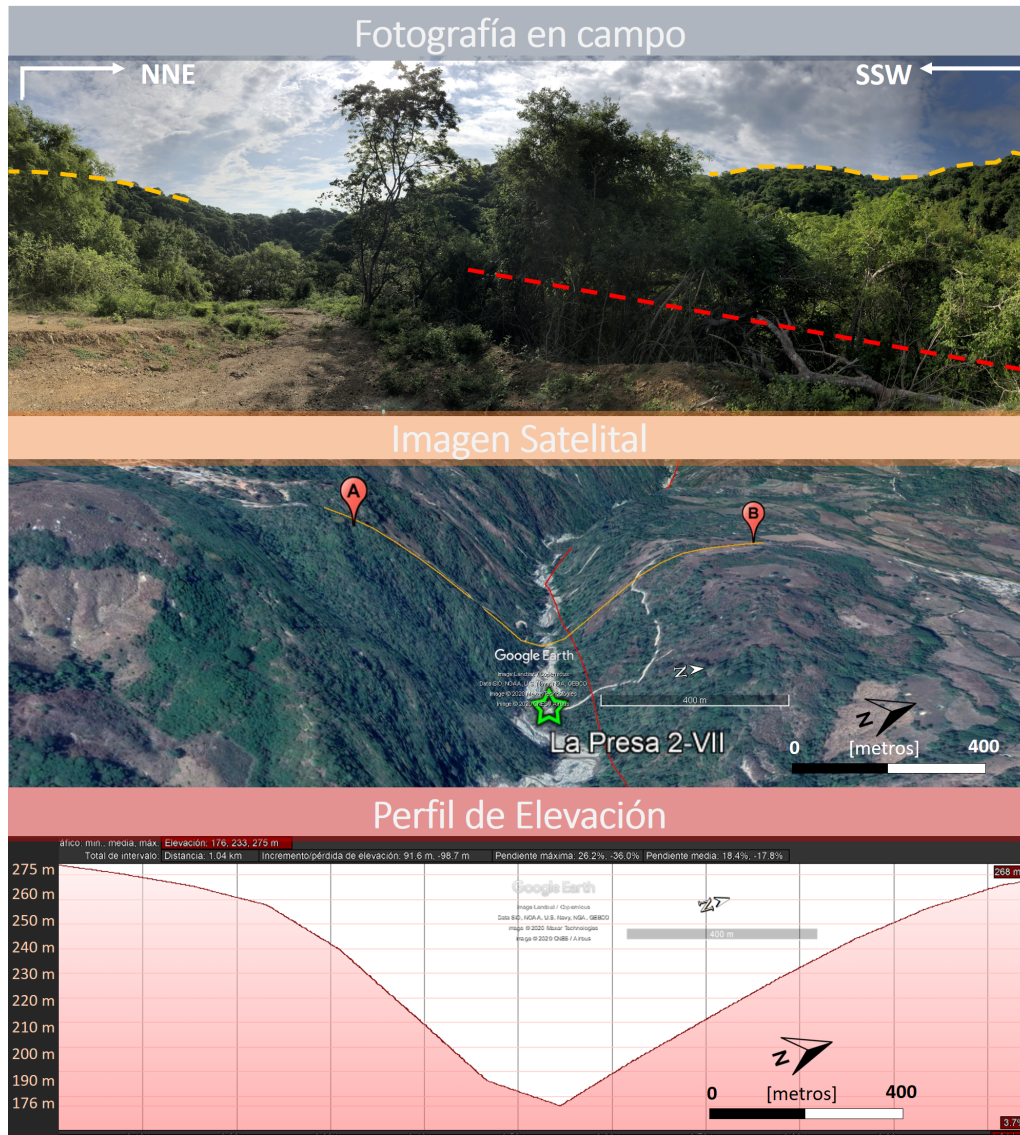


Figura 5.29: Evidencia de estación La Presa: formas de relieve. La línea roja punteada indica el plano de falla, las líneas anaranjadas señalan las colinas a los alrededores de donde corre el río. La imagen satelital y el perfil de elevación fueron obtenidos con Google Earth Pro (2019). Octubre del 2019.

5.2.3. Estación La Tercia

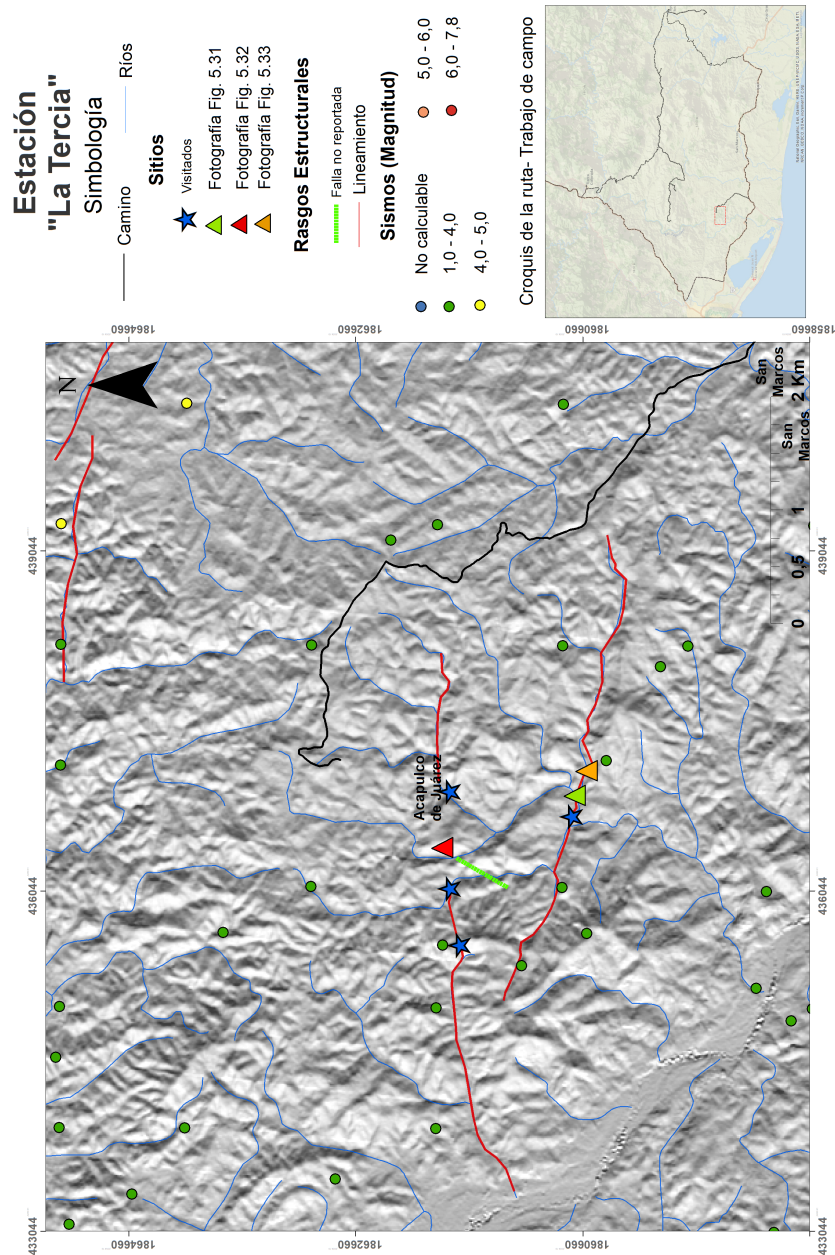


Figura 5.30: Mapa de la estación “La Tercia”. Los sismos fueron consultados en el catálogo del Servicio Sismológico Nacional (2019), las profundidades de los hipocentros se encuentran por arriba de los 17-38 km de profundidad. Elaborado con ArcMap, 2019.

En esta región encontramos aflorando cuerpos graníticos con un grado de meteorización de moderado a alto y con cristales grandes de cuarzo y feldespatos (ver Fig. 5.31 A). Además, en algunas partes fue posible observar gneis con bandas de color blanco y oscuras y con cristales de cuarzo, feldespatos y micas (ver Fig. 5.31 B). Igualmente vimos cuerpos bandeados de migmatitas (ver Fig. 5.31 C).

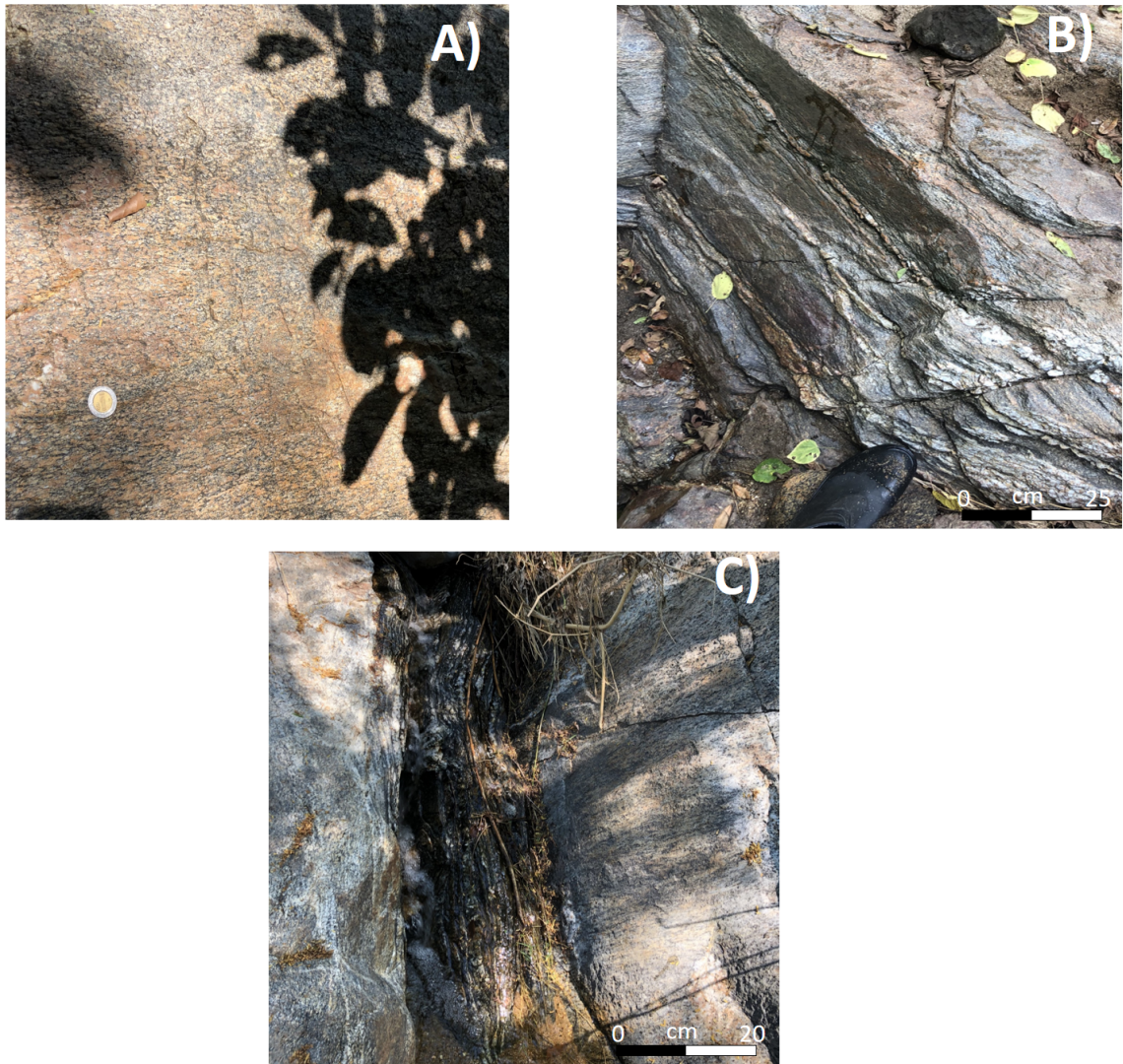


Figura 5.31: Litología de la estación La Tercia. En la imagen A) se muestran los cuerpos graníticos con un grado considerable de meteorización (color pardo), en B) se observan gneis con bandas de color blanco con espesores que varían desde 2 y hasta 5 cm, en C) se muestran los cuerpos bandeados que corresponden a las migmatitas. Octubre del 2019.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

Con la evidencia recabada en campo de esta estación, con su posterior análisis y con la utilización de imágenes satelitales pudimos identificar una falla que no teníamos trazada previamente, y que además, tampoco aparece en la carta del *Servicio Geológico Mexicano*. Se estima que esta estructura tiene una longitud de por lo menos 500 metros. La ubicación y coordenadas de esta falla se muestran en la Fig. 5.32.

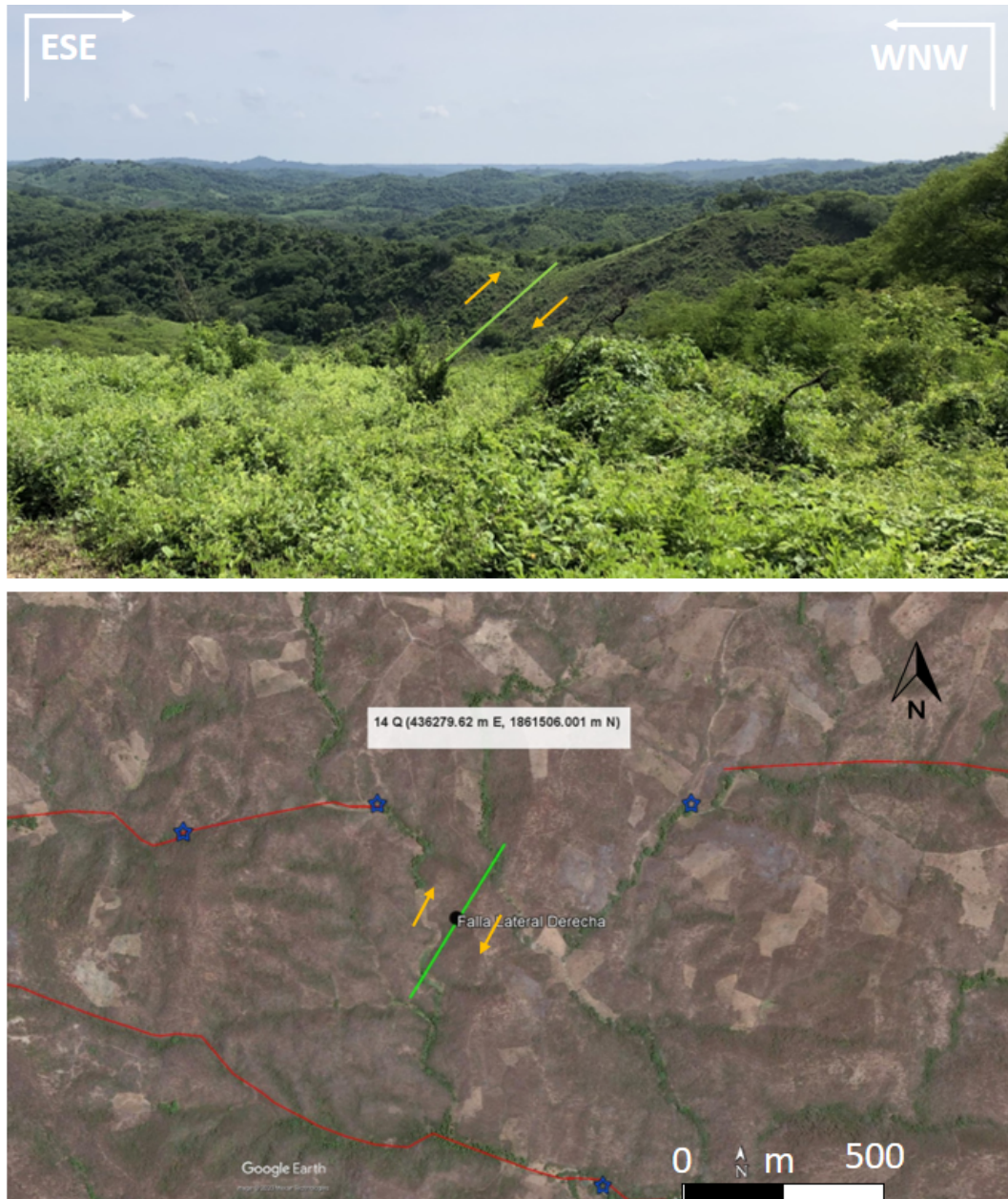


Figura 5.32: Falla lateral derecha. Octubre del 2019.

Como prueba de la ocurrencia de fallamiento observamos que el plano de fractura y las estrías encontradas, tenían la siguiente orientación:

1. Dirección del buzamiento del plano de fractura: 116/40
2. Carácter de las estrías: 190/15

El análisis de la cinemática de los indicadores nos sugiere que se trata de una falla con desplazamiento lateral derecho y con una componente normal (ver Fig. 5.33).

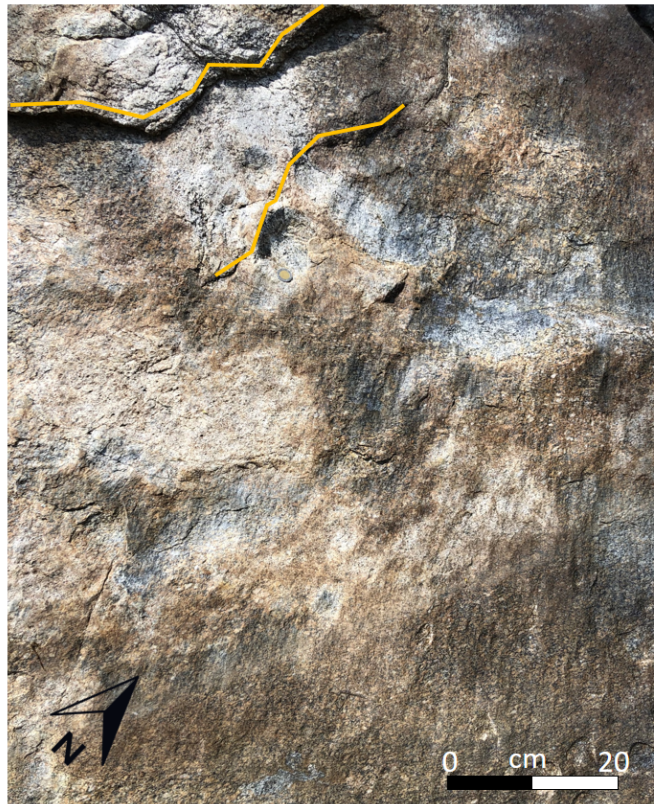


Figura 5.33: Evidencia de fallamiento de la estación La Tercia. Octubre del 2019.

Finalmente, la proyección en la red estereográfica de los datos estructurales anteriores es la siguiente:

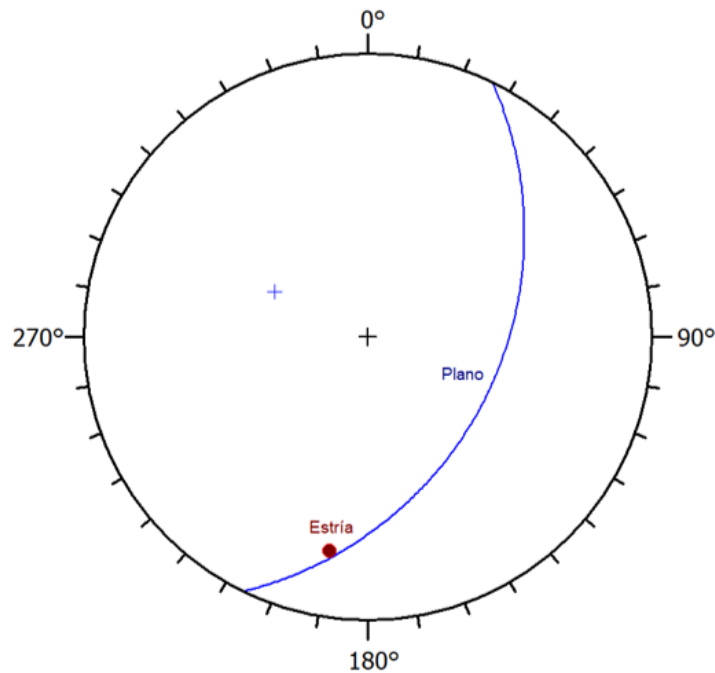


Figura 5.34: Actitud del plano de falla y estrías. Elaborado con Stereo32, 2019.

5.3. Actividad sísmica del área de estudio

Debido a los objetivos de este trabajo se consideró la actividad sísmica de estructuras corticales, es decir, se tomaron en cuenta únicamente sismos *intraplaca* (aquellos que se generaron por encima de la interfaz de subducción entre la placa de Cocos y la Norteamericana). Considerando el modelo de Ferrari et al. (2012) sobre la profundidad de las placas y su interfaz de subducción, en nuestra área de estudio la placa Norteamericana se encuentra por arriba de los 17 y 38 km en profundidad. En las Fig.5.35 y 5.36 podemos observar la distribución de los sismos que fueron registrados por el *Servicio Sismológico Nacional* y el *Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)* respectivamente.

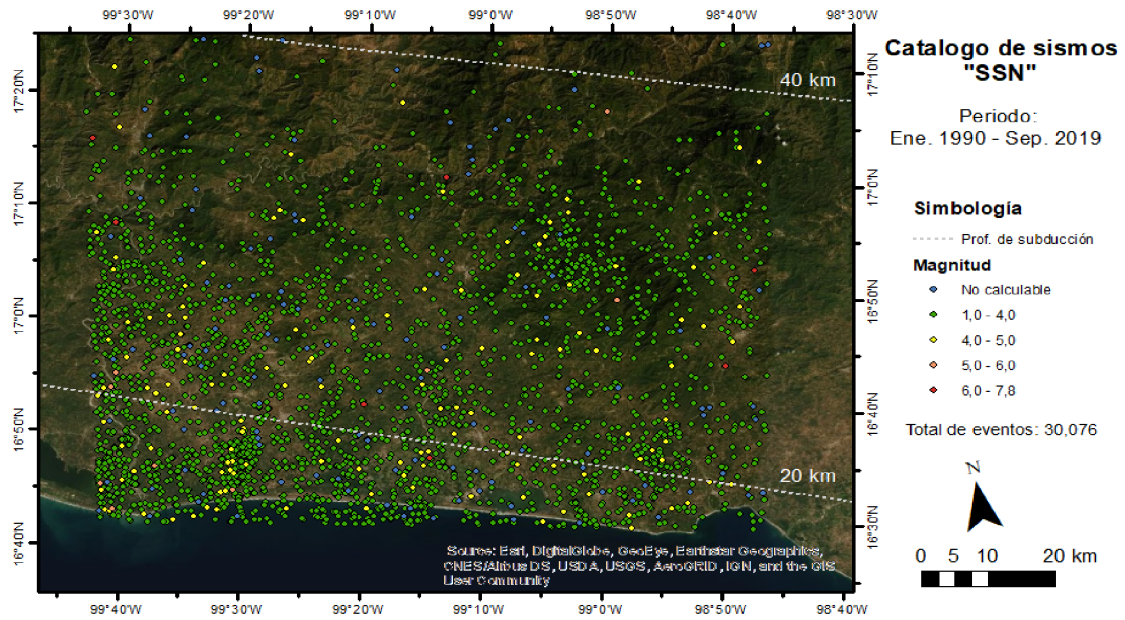


Figura 5.35: Mapa de eventos sísmicos. Fuente: Catálogo del Servicio Sismológico Nacional. Elaborado con ArcMap,2019.

Identificación de fallas activas en el Sureste del estado de Guerrero

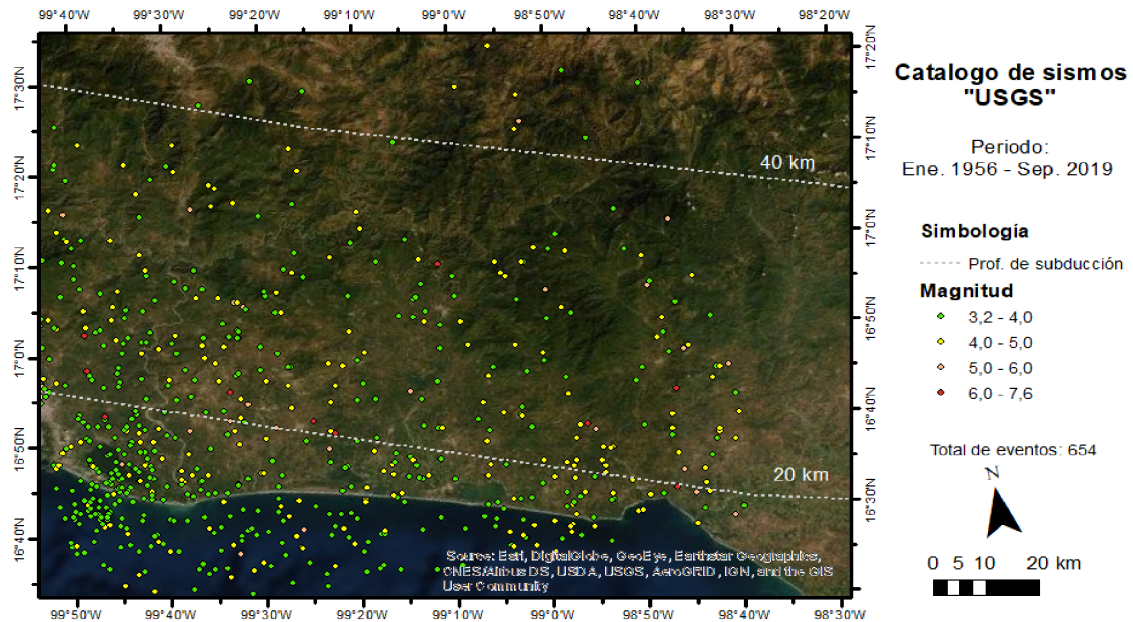


Figura 5.36: Mapa de eventos sísmicos. Fuente: Catálogo del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Elaborado con ArcMap, 2019.

De los mapas anteriores se puede observar que la base de datos con mayor densidad es la del *Servicio Sismológico Nacional*, por lo tanto fue la principal fuente de información que utilizamos para nuestro análisis.

Como se mencionó anteriormente se buscó una relación entre la actividad sísmica de la zona y las estructuras que marcamos, y aunque existen epicentros cercanos a los lineamientos, éstos tienen magnitudes inferiores a 4, por lo que la elaboración de mecanismos focales para representar la naturaleza de los esfuerzos que generaron los eventos sísmicos tiende a ser algo impreciso para eventos de bajas magnitudes (Dahal y Ebel, 2020). En la Figura 5.37 se muestra el ejemplo de algunos epicentros cercanos a los lineamientos. En color amarillo se resalta un evento que tuvo las siguientes características:

Características	
Fecha:	24 de marzo del 2018
Magnitud:	3.5
Profundidad:	4.9 km

Tabla 5.2: Características de epicentro

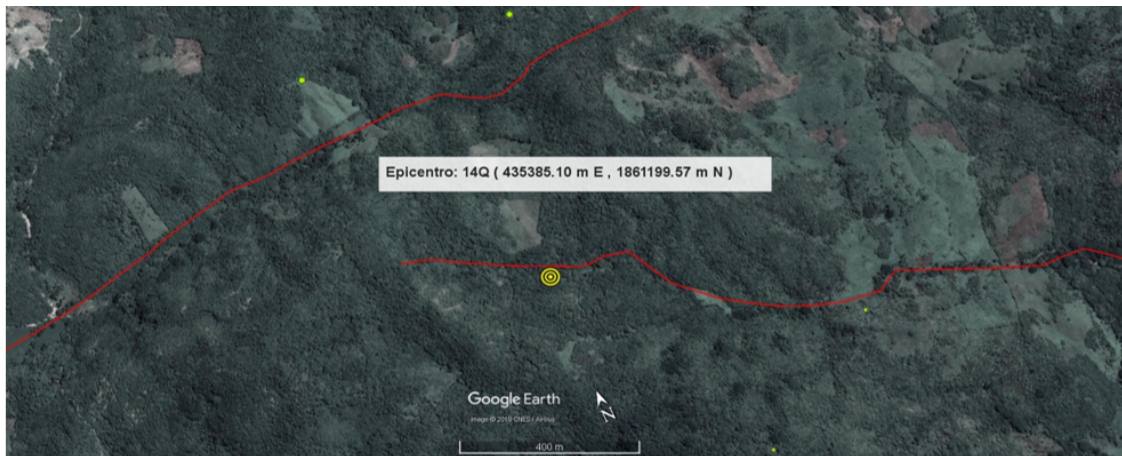


Figura 5.37: Epicentros cercanos a los lineamientos. Elaborado con Google Earth, 2019.

Discusión y conclusiones

En diversas partes del mundo se ha documentado la utilización de información obtenida con sensores remotos, catálogos de eventos sísmicos y estudios en general del relieve con la finalidad de identificar fallas activas (Fu y Awata, 2007; Mahmood y Gloaguen, 2012; Ahmad et al., 2014; Gaidzik et al., 2016). Con los insumos y herramientas anteriores se realizó un estudio del relieve en la porción sureste del estado de Guerrero con la finalidad de trazar probables fallas. Además, como se mencionó al inicio de este trabajo, en las investigaciones que realizaron Gaidzik y Ramírez Herrera (2017) y Fasola et al. (2019) hay indicios de que en los límites entre los terrenos *Xolapa* y *Mixteco* se están llevando a cabo episodios de sismos lentos sobre lo que parece ser una *falla lateral izquierda* de grandes dimensiones.

En la zona de fallamiento Kunlun, al norte del Tíbet (China) se ha demostrado que son dos fallas laterales las que ayudan a la redistribución de esfuerzos asociados a la colisión entre la placa Euroasiática y la Indoaustraliana (Fu y Awata, 2007). Fue el estudio de esas grandes estructuras lo que permitió entender un poco más sobre la naturaleza de la compleja interacción entre los bordes de dichas placas. Los límites entre placas tectónicas aún no están del todo comprendidos y el caso de la Zona de Subducción Mexicana es aún más interesante debido a la forma en que la placa de Cocos subduce bajo la Norteamericana (Gaidzik et al., 2016), además, se ha señalado que es la actividad de grandes fallas laterales en zonas de subducción oblicuas las que causan mayores daños por terremotos (Gaidzik et al., 2016). Por lo anterior, se justifica la importancia de comprender la deformación cortical que se está llevando a cabo en esta región, pues son este tipo de estudios los que nos proporcionan una mejor comprensión de lo que está sucediendo en esta área.

Los resultados que obtuvimos satisfacen en parte los objetivos de este trabajo, pues diferentes fallas pudieron ser corroboradas y/o encontradas. Si bien algunas de las evidencias identificadas (como el nivel de conservación de los indicadores cinemáticos o las formas de relieve asociadas a la ocurrencia de fallas) no son suficientes para confirmar un estado activo de las mismas, lo reportado en este trabajo puede ser un punto de partida para la utilización de otras técnicas en el área que permitan identificar con un mayor nivel de detalle otras estructuras (por ejemplo, el uso datación cosmogénica o la utilización de

modelos Lidar), tal como ha sucedido en Estados Unidos (Bruhn et al., 2006) (Unruh et al., 2013), Suecia (Mikko et al., 2014) o Nueva Zelanda (De Pascale, 2014).

Como se observó en la sección de resultados, pudimos ubicar fallas laterales tanto con un desplazamiento dextral como sinestral. Sin embargo, si se observa el mapa con todos los lineamientos marcados (Fig. 5.13), aún existen muchos que pueden ser investigados. México tiene una configuración geológica y tectónica compleja (Centeno-García, 2017) y al igual que muchos países ubicados dentro de lo que se conoce como el *Cinturón de Fuego del Pacífico*, estamos propensos a sufrir terremotos de gran magnitud, por lo que es muy importante no subestimar el riesgo asociado a los sismos generados en estas zonas, y más en específico de los sismos *intraplaca*. Berryman et al. (2012) mencionan que los periodos de recurrencia de los sismos generados en los límites entre las Placas Tectónicas van desde decenas hasta cientos de años, mientras que los eventos intraplaca tienen un periodo de recurrencia aproximadamente de miles a decenas de miles de años (lo cual excede por mucho el periodo de registro instrumentado sísmico). Es entonces clara la importancia de identificar fallas activas o a aquellas que se pudieran reactivar bajo el actual ambiente de esfuerzos (como sucedió con la falla de Gafsa al sur de Túnez, Hassen et al. (2014)), pues al no tener este tipo de conocimiento o registro, la población puede ser más vulnerable a este tipo de desastres.

Por último, es importante tener presente que los procesos dinámicos del sistema Tierra en el que vivimos se evidencian a través de muchos y distintos fenómenos geológicos (como erupciones volcánicas, creación de piso oceánico o incluso las formas del relieve) por lo que es necesario saber identificarlos, leerlos e interpretarlos de una manera correcta. Con el desarrollo tecnológico que tenemos hasta el momento aún no es posible predecir la ocurrencia de terremotos, sin embargo contamos con la capacidad y herramientas de investigación que nos permitan elaborar y mejorar los planes de ***Prevención y Mitigación*** de desastres.

Referencias

- Ahmad, S., Bhat, M., Madden, C., y Bali, B. (2014). Geomorphic analysis reveals active tectonic deformation on the eastern flank of the Pir Panjal Range, Kashmir Valley, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2225–2235.
- ArcMap. (2019). v. 10.6.1 [Manual de software informático].
- Arora, K., Cazenave, A., Engdahl, E. R., Kind, R., Manglik, A., Roy, S., . . . Uyeda, S. (2011). *Encyclopedia of solid earth geophysics*. Springer Science & Business Media.
- Arzate-Flores, J. A., Molina-Garza, R., Corbo-Camargo, F., y Márquez-Ramírez, V. (2016). Low angle contact between the Oaxaca and Juárez terranes deduced from magnetotelluric data. En *Geodynamics of the latin american pacific margin* (pp. 3357–3371). Springer.
- Barckhausen, U., Ranero, C. R., von Huene, R., Cande, S. C., y Roeser, H. A. (2001). Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica: Implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B9), 19207–19220.
- Beroza, G. C., y Ide, S. (2011). Slow earthquakes and nonvolcanic tremor. *Annual review of Earth and planetary sciences*, 39, 271–296.
- Berryman, K. R., Cochran, U. A., Clark, K. J., Biasi, G. P., Langridge, R. M., y Villamor, P. (2012). Major earthquakes occur regularly on an isolated plate boundary fault. *Science*, 336(6089), 1690–1693.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3).
- Bruhn, R., McCalpin, J., Pavlis, T., Gutierrez, F., Guerrero, J., y Lucha, P. (2006). Active tectonics of western Saint Elias orogen, Alaska: Integration of LIDAR and field geology. En *Agu fall meeting abstracts*.
- Bull, W. B. (2008). *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*. John Wiley & Sons.

- Burbank, D. W., y Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Byerlee, J. (1990). Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophysical Research Letters*, 17(12), 2109–2112.
- Çakir, Z., Ergintav, S., Özener, H., Dogan, U., Akoglu, A. M., Meghraoui, M., y Reilinger, R. (2012). Onset of aseismic creep on major strike-slip faults. *Geology*, 40(12), 1115–1118.
- Campa, P. J., Maria Fernanda Coney. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040–1051.
- Carpenter, B., Marone, C., y Saffer, D. (2011). Weakness of the San Andreas Fault revealed by samples from the active fault zone. *Nature Geoscience*, 4(4), 251.
- Carrillo-Martínez, M. (1971). *Geología de la Hoja San José de Gracia, Sinaloa: México, DF, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis, 154 p.
- Centeno-García, E. (2017). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews*, 81, 1035–1052.
- Centeno-García, E., Anderson, T., Nourse, J., McKee, J., y Steiner, M. (2005). Review of Upper Paleozoic and Lower Mesozoic stratigraphy and depositional environments, central and west Mexico: Constraints on terrane analysis and paleogeography. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 393, 233.
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M., y Gehrels, G. (2011). Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc. *Bulletin*, 123(9-10), 1776–1797.
- Centeno-García, E., y cols. (2008). The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 436, 279.
- Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P. J., Patchett, P. J., y Ortega-Gutiérrez, F. (1993). Guerrero terrane of Mexico: Its role in the Southern Cordillera from new geochemical data. *Geology*, 21(5), 419–422.
- Dahal, N. R., y Ebel, J. E. (2020). Method for Determination of Focal Mechanisms of Magnitude 2.5–4.0 Earthquakes Recorded by a Sparse Regional Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*.

- DeMets, C., Gordon, R. G., y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1–80.
- De Pascale, G. P. (2014). Neotectonics and Paleoseismology of the Central Alpine Fault, New Zealand.
- Dickinson, W. R., y Lawton, T. F. (2001). Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(9), 1142–1160.
- Doblas, M. (1998). Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295(1-2), 187–197.
- Ducea, M. N., Gehrels, G. E., Shoemaker, S., Ruiz, J., y Valencia, V. A. (2004). Geologic evolution of the Xolapa Complex, southern Mexico: Evidence from U-Pb zircon geochronology. *Geological Society of America Bulletin*, 116(7-8), 1016–1025.
- Elías-Herrera, M., y Ortega-Gutiérrez, F. (2002, 06). Caltepec fault zone: An Early Permian dextral transpressional boundary between the Proterozoic Oaxacan and Paleozoic Acatlán complexes, southern Mexico, and regional implications. *Tectonics*, 21, 4-1. doi: 10.1029/2000TC001278
- Elias-Herrera, M., Sánchez-Zavala, J., y Macías-Romo, C. (2000). Geologic and geochronologic data from the Guerrero terrane in the Tejupilco area, southern Mexico: New constraints on its tectonic interpretation. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4-5), 355–375.
- Fasola, S. L., Brudzinski, M. R., Holtkamp, S. G., Graham, S. E., y Cabral-Cano, E. (2019). Earthquake swarms and slow slip on a sliver fault in the Mexican subduction zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7198–7206.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., y Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122–149.
- Franco, R. (2017). Composiciones Landsat en ARCGIS. *Guía Básica. Bogotá, Colombia*. 45p.
- Fu, B., y Awata, Y. (2007). Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2-3), 253–265.
- Gaidzik, K., y Ramírez Herrera, M. T. (2017). Geomorphic indices and relative tectonic uplift in the Guerrero sector of the Mexican forearc. *Geoscience Frontiers*, 8(4), 885–902.

- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M. T., y Kostoglodov, V. (2016). Active crustal faults in the forearc region, Guerrero sector of the Mexican subduction zone. *Pure and Applied Geophysics*, 173(10-11), 3419–3443.
- Google Earth Pro. (2019). v. 7.3.2.5 [Manual de software informático].
- Gudmundsson, A. (2011). *Rock fractures in geological processes*. Cambridge University Press.
- Hassen, M. B., Deffontaines, B., y Turki, M. M. (2014). Recent tectonic activity of the Gafsa fault through morphometric analysis: Southern Atlas of Tunisia. *Quaternary International*, 338, 99–112.
- Hey, R. (1977). Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. *Geological Society of America Bulletin*, 88(12), i–vi.
- Jödicke, H., Jording, A., Ferrari, L., Arzate, J., Mezger, K., y Rüpke, L. (2006). Fluid release from the subducted Cocos plate and partial melting of the crust deduced from magnetotelluric studies in southern Mexico: Implications for the generation of volcanism and subduction dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B8).
- Keller, E. A., y Pinter, N. (1996). *Active tectonics* (Vol. 19). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Miller, B., Ortega-Rivera, A., Roldán-Quintana, J., y Lee, J. (2006). Geochronology and geochemistry of the Francisco Gneiss: Triassic continental rift tholeiites on the Mexican margin of Pangea metamorphosed and exhumed in a Tertiary core complex. *International Geology Review*, 48(1), 1–16.
- Lang, H. R., Barros, J. A., Cabran-Cano, E., Draper, G., Harrison, C. G., Jansma, P. E., y Johnson, C. A. (2013). Terrane deletion in northern Guerrero state. *Geofísica Internacional*, 35(4).
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404(3-4), 237–264.
- Lowman Jr, P. D., y Montgomery, B. C. (1996). *Global Seismicity: Three New Maps Compiled with Geographic Information Systems*.
- Lutgens, F. K., y Tarbuck, E. J. (1999). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física* (Vol. 540). Prentice Hall Madrid.
- Mahmood, S. A., y Gloaguen, R. (2012). Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geoscience Frontiers*, 3(4), 407–428.

- Martini, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., Cerca-Martínez, M., Valencia, V., Serrano-Durán, L., ... Dickinson, W. (2009). Cretaceous–Eocene magmatism and Laramide deformation in southwestern Mexico: No role for terrane accretion. *Backbone of the Americas: Shallow subduction, plateau uplift, and ridge and terrane collision: Geological Society of America Memoir*, 204, 151–182.
- Martini, M., Ferrari, L., López-Martínez, M., y Valencia, V. (2010). Stratigraphic redefinition of the Zihuatanejo area, southwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(3), 412–430.
- Mikko, H., Smith, C., Lund, B., Ask, M., y Munier, R. (2014, 01). *Neotectonic faulting in Sweden: Surface expressions from the LiDAR based digital elevation model*.
- Morán-Zenteno, D. (1993). Southern Mixteco and northern Xolapa terranes. *Terrane geology of southern Mexico*, 34–45.
- Obara, K., y Kato, A. (2016). Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, 353(6296), 253–257.
- Okino, K. (2018). *Plate Motion Calculator*. Descargado de http://ofgs.aori.u-tokyo.ac.jp/~okino/platecalc_new.html
- Ortega-Gutiérrez, F. (1981). Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geofísica Internacional*, 20(3).
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macías-Romo, C., y López, R. (1999, 08). Late Ordovician–Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology*, 27(8), 719–722. Descargado de [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0719:LOESCC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0719:LOESCC>2.3.CO;2) doi: 10.1130/0091-7613(1999)027<0719:LOESCC>2.3.CO;2
- Ouchi, S. (2005). Development of offset channels across the San Andreas fault. *Geomorphology*, 70(1-2), 112–128.
- Ramírez-Espinosa, J., Campa, M., Talavera, O., y Guerrero, M. (1991). Caracterización de los arcos insulares de la Sierra Madre del Sur y sus implicaciones tectónicas: Convención sobre la Evolución Geológica de México. En *Primer congreso mexicano de mineralogía, memoria: Pachuca, hgo., mexico, instituto de geología, unam* (pp. 163–166).
- Ramírez Herrera, M. T., Gaidzik, K., Forman, S., Kostoglodov, V., Bürgmann, R., y Johnson, C. W. (2018). Relating the long-term and short-term vertical deformation across a transect of the forearc in the central Mexican subduction zone. *Geosphere*, 14(2), 419–439.

- Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen ein Beitrag zum Problem der Fiederspatten. *Zentbl. Miner. Geol. Palaont. Abt.*, 354–368.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., y Speed, R. C. (1993). *Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico* (Vol. 278). Geological Society of America.
- Servicio Sismológico Nacional, U. (2019). *Catálogo de Sismos*. Descargado de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Sloan, D. (2006, Apr). *On The Move* -. Descargado de <https://baynature.org/article/on-the-move/>
- Solari, L. A., de León, R. T., Hernández Pineda, G., Solé, J., Solís-Pichardo, G., y Hernández-Treviño, T. (2007). Tectonic significance of Cretaceous–Tertiary magmatic and structural evolution of the northern margin of the Xolapa Complex, Tierra Colorada area, southern Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9-10), 1265–1279.
- Sylvester, A. G. (1988). Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11), 1666–1703.
- Talavera-Mendoza, O., Ramírez-Espinosa, J., y Guerrero-Suástegui, M. (1995). Petrology and geochemistry of the Teloloapan subterrane, a Lower Cretaceous evolved intra-oceanic island-arc. *Geofísica Internacional*, 34(1), 3–22.
- Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Corona-Chavez, P., Gehrels, G. E., Sarmiento-Villagrana, A., García-Díaz, J. L., y Salgado-Souto, S. A. (2013). Origin and provenance of basement metasedimentary rocks from the Xolapa Complex: New constraints on the Chortis–southern Mexico connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 369, 188–199.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Cientificas, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación Madrid.
- Tardy, M., Lapierre, H., Freydier, C., Coulon, C., Gill, J.-B., De Lepinay, B. M., ... others (1994). The Guerrero suspect terrane (western Mexico) and coeval arc terranes (the Greater Antilles and the Western Cordillera of Colombia): A late Mesozoic intra-oceanic arc accreted to cratonal America during the Cretaceous. *Tectonophysics*, 230(1-2), 49–73.
- Tolson, G. (2007). The Chacalapa fault, southern Oaxaca, Mexico. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 343–357.
- United States Geological Survey (USGS). (2019). *Plate boundaries kmz file*. Descargado de <https://www.usgs.gov/media/files/plate-boundaries-kmz-file>

- Unruh, J., Gray, B., Lutz, A., Bozkurt, S., Bjornstad, S., y Tiedemann, A. (2013, 01). Use of LiDAR data for neotectonic evaluation of Superstition Hills and Superstition Mountain, Salton Trough, California. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 37, 479-484.
- Van der Pluijm, B. A., y Marshak, S. (2004). *Earth structure*. New York.
- Wallace, R. E. (1990). *The San Andreas fault system, California* (n.º 1515). US Government Printing Office.
- Yáñez, P., Ruiz, J., Patchett, P. J., Ortega-Gutierrez, F., y Gehrels, G. E. (1991). Isotopic studies of the Acatlan complex, southern Mexico: Implications for Paleozoic North American tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(6), 817–828.