



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

LICENCIATURA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

GENERACIÓN: 2013-2018

TESIS

**“ACTIVIDAD GEOLÓGICA DE LA FALLA PERALES Y SUS
PELIGROS GEOLÓGICOS ASOCIADOS EN LA REGIÓN DE
IXTLAHUACA, ESTADO DE MÉXICO.”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS**

PRESENTA

ANUAR DE JESÚS GARCÍA

ASESOR

M. EN C. EDGAR ANGELES MORENO

REVISORES

DR. EN C. T. ALEXIS ORDAZ HERNANDEZ
DR. EN C. HÉCTOR VÍCTOR CABADAS BÁEZ

Toluca, Estado de México, octubre del 2018.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 Planteamiento y justificación del problema | 1 |
| 1.2 Hipótesis..... | 2 |
| 1.3 Objetivos..... | 3 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.4 Área de estudio | 3 |
| 2. METODOLOGÍA | 5 |
| 2.1 Método científico | 5 |
| 2.2 Investigación documental | 6 |
| 2.3 Fotogeología y fotointerpretación geológica..... | 7 |
| 2.4 Geología de campo..... | 8 |
| 2.5 Identificación y descripción de los peligros geológicos | 10 |
| 2.6 Mapa de peligros geológicos..... | 10 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 12 |
| 3.1 Fallas mayores en el área central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)..... | 12 |
| 3.2 Estratigrafía volcánica de la región de Ixtahuaca. | 14 |
| 3.3 Las fallas en la región de Ixtlahuaca..... | 15 |
| 3.4 Peligros geológicos asociados a fallas | 16 |
| 3.5 Antecedentes de peligros geológicos en la falla Perales..... | 17 |
| 4. ESTRATIGRAFÍA | 18 |
| 4.1 Cretácico | 18 |
| 4.1.1 Formación Xochipala: Esquistos y Filitas Pelíticas | 18 |
| 4.2 Oligoceno-Mioceno..... | 21 |
| 4.2.1 Vetas de cuarzo y diques riolíticos de San Pedro el Alto | 21 |
| 4.2.2 Ignimbrita San Miguel Yuxtepec | 22 |
| 4.3 Mioceno | 25 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.1 Andesitas-Basaltos Santa Ana Ixtlahuaca..... | 25 |
| 4.3.2 Depósitos Piroclásticos Perales | 27 |
| 4.4 Plioceno-Cuaternario..... | 28 |
| 4.4.1 Ignimbrita de la caldera “El capulín” | 28 |
| 4.4.2 Unidad Concepción-San Pedro los baños..... | 28 |
| 4.4.3 Estructuras y depósitos volcánicos Plio-Cuaternarios | 32 |
| 4.4.3.1 Volcán Til..... | 33 |
| 4.4.3.2 Volcanes Coajomulco-Tlalchichilpa..... | 33 |
| 4.4.3.3 Volcán Purísima Concepción Mayorazgo..... | 34 |
| 4.4.3.4 Volcán los Arenales | 35 |
| 4.4.3.5 Volcán Jalpa | 36 |
| 4.4.3.6 Volcán San Antonio Mextepec | 38 |
| 4.4.3.7 Andesitas San Jerónimo Bonchete | 39 |
| 4.4.3.8 Volcán La Guadalupana..... | 41 |
| 4.4.4 Depósitos epiclásticos y volcanosedimentarios en el escarpe de la falla Perales y en el Valle de Ixtlahuaca | 44 |
| 4.4.4.1 Depósitos piroclásticos Mextepec | 44 |
| 4.4.4.2 Depósitos de Coluvión y Talud | 47 |
| 4.4.4.3 Abanicos aluviales | 54 |
| 4.4.4.4 Depósitos volcánicos y sedimentarios del Valle de Ixtlahuaca | 56 |
| 4.4.4.5 Depósitos fluviales del Rio Lerma | 60 |
| 5. GEOLOGIA ESTRUCTURAL Y PELIGROS GEOLOGICOS..... | 62 |
| 5.1 Geología Estructural..... | 62 |
| 5.1.1 Sistema de fallas Perales (falla Perales) | 63 |
| 5.1.1.1 Sistema de fallas Perales (NW-SE) | 63 |
| 5.1.1.2 Sistema de fallas NE-SW..... | 72 |
| 5.1.2 Falla Mazahua | 73 |
| 5.1.3 Fallas San Felipe..... | 74 |
| 5.1.4 Falla San Pedro de los Baños | 75 |
| 5.2 Peligros geológicos..... | 76 |
| 5.2.1 Deslizamientos..... | 77 |
| 5.2.2 Formación de grietas y fracturas (Agrietamientos) | 87 |
| 5.2.3 Sismicidad | 90 |
| 6. Conclusiones | 92 |
| REFERENCIAS..... | 94 |
| Anexos | 100 |
| <i>Anexo 1.- Mapa Geológico.....</i> | <i>1</i> |
| <i>Anexo 1.1.- Sección A-B.....</i> | <i>2</i> |
| <i>Anexo 1.2.- Sección C-D.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Anexo 2.- Mapa Geológico-estructural.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Anexo 3.- Mapa de susceptibilidad a deslizamientos</i> | <i>1</i> |

| | |
|--|----------|
| <i>Anexo 4.- Mapa de Agrietamientos.....</i> | <i>1</i> |
|--|----------|

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Ubicación de la falla Perales..... | 15 |
| Figura 2.1 - Esquema metodológico..... | 22 |
| Figura 3.1 - Ubicación de la falla Perales (contexto de los sistemas de fallas)..... | 24 |
| Figura 3.2 - Mapa geológico del Estado de México..... | 27 |
| Figura 4.1 – Mapa geológico..... | 29 |
| Figura 4.2 - Filitas pelíticas del cretácico..... | 30 |
| Figura 4.3 - Filitas pelíticas del cretácico superior (micropliegues)..... | 31 |
| Figura 4.4 - Dique-falla de composición riolítica que intruciona las rocas cretácicas..... | 33 |
| Figura 4.5 - Ignimbrita San Miguel Yuxtepec..... | 35 |
| Figura 4.6 - Banco de material con derrames de andesita..... | 37 |
| Figura 4.7 - Depósitos Piroclásticos Perales..... | 38 |
| Figura 4.8 - Iglesia en la cual emergía el agua termal..... | 40 |
| Figura 4.9 - Geiseritas de la unidad Concepción-San Pedro los baños..... | 42 |
| Figura 4.10. - Depósitos piroclásticos Concepción-San Pedro los baños..... | 43 |
| Figura 4.11 - Andesitas del complejo volcánico Coajomulco-Tlalchichilpa..... | 45 |
| Figura 4.12 - Flujo de lava basáltico del Volcán los Arenales..... | 47 |
| Figura 4.13 - Flujo piroclástico del Volcán Jalpa..... | 48 |
| Figura 4.14 - Cono piroclástico Antonio y andesitas de San Jerónimo..... | 50 |
| Figura 4.15 - Derrame andesítico de San Jerónimo Bonchete..... | 51 |
| Figura 4.16 - Flujos andesítico-basálticos de la Guadalupana..... | 54 |
| Figura 4.17 - Depósitos de talud del Volcán de la Guadalupana..... | 55 |
| Figura 4.18 - Depósitos piroclásticos de caída (Escarpe falla Perales)..... | 57 |
| Figura 4.19 - Depósitos de deslizamiento y coluvión..... | 59 |
| Figura 2.10 - Deslizamiento y la cabecera del mismo..... | 60 |
| Figura 4.21 - Deslizamiento sobre un flujo piroclásticos..... | 61 |
| Figura 4.22 - Deslizamiento San Isidro..... | 62 |
| Figura 4.23 - Depósitos de talud de falla asociados a fallas..... | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.24 - facies sedimentarias de abanicos aluviales..... | 65 |
| Figura 4.25 - Abanico aluvial con cárcavas..... | 66 |
| Figura 4.26 - Valle de Ixtlahuaca y Volcan Jocotitlan..... | 68 |
| Figura 4.27 - Columna estratigráfica del Valle de Ixtlahuaca | 70 |
| Figura 4.28 - Rio Lerma y sus llanuras de inundación..... | 72 |
| Figura 5.1 – Mapa geológico-estructural..... | 73 |
| Figura 5.2 - Red estereográfica..... | 75 |
| Figura 5.3 Sistema de fallas Perales en San Isidro Boxipe..... | 76 |
| Figura 5.4 - Sección geológica A-B..... | 77 |
| Figura 5.5 - Falla Perales..... | 78 |
| Figura 5.6 - Zona de fallas y fracturas NW-SE..... | 79 |
| Figura 5.7 - Rocas metamórficas de la Formación Xochipala..... | 81 |
| Figura 5.8 - Sistemas de fallas en el sistema de falla Perales..... | 82 |
| Figura 5.9 - Falla Mazahua..... | 85 |
| Figura 5.10 - Fallas y fracturas San Felipe..... | 86 |
| Figura 5.11 - Areniscas de la unidad Concepción-San Pedro de los Baños..... | 87 |
| Figura 5.12 - Deslizamiento cerca de San Miguel de las Manzanas..... | 90 |
| Figura 5.13 - Deslizamiento de San Pedro el Alto..... | 92 |
| Figura 5.14 .- Deslizamiento con pedazos de cerámica..... | 93 |
| Figura 5.15 - Diferentes tipos de movimientos de terreno..... | 94 |
| Figura 5.16 – Mapa de susceptibilidad a deslizamientos..... | 97 |
| Figura 5.17 - Agrietamiento en casa..... | 99 |
| Figura 5.18 - Casa agrietadas..... | 100 |
| Figura 5.19 - Mapa grietas..... | 101 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|---|
| Tabla 1.- Pasos del método científico y su modo de trabajo..... | 6 |
|---|---|

Resumen

La falla Perales está ubicada en la parte central de Faja Volcánica Transmexicana y es parte del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende. A otra escala menos regional, la falla limita a la cuenca del Valle de Ixtlahuaca de la Sierra Mazahua, y se encuentra dentro de los municipios de Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso en el Estado de México. El presente trabajo muestra, en parte, la caracterización estratigráfica, geológico estructural y geológico-ambiental de la falla Perales, siendo el objetivo principal la definición de zonas de peligros geológicos por fracturamiento y fallamiento resultado de la actividad geológica de la falla. Ya que la falla es una expresión fisiográfica importante y de influencia en la distribución de recursos naturales en el Valle de Ixtlahuaca, y de la falla se desconocía su geología y los peligros geológicos asociados. Para lograr el objetivo se aplicaron metodologías referentes a la investigación documental, fotointerpretación geológica, geología de campo y geología ambiental con apoyo del sistema de información geográfica ArcGis.

La estratigrafía que se presenta en los bloques del alto y bajo de la falla Perales son rocas del Cretácico pertenecientes a la formación Xochipala (filitas y esquistos pelíticos), rocas volcánicas andesítico-basálticas miocénicas, rocas volcánicas andesíticas y basálticas Plio-pleistocénicas, depósitos volcánicos del Cuaternario, depósitos fluvio-lacustres de la Depresión del Valle de Ixtlahuaca y geiseritas y alteraciones hidrotermales de la unidad Concepción-San Pedro los Baños.

Se definieron dos sistemas de fallas normales pertenecientes a la falla Perales. Estos sistemas de fallas son NW-SE y NE-SW. Estas fallas presentan brechas de falla en su núcleo y están asociadas con depósitos de talud, coluvión y abanicos aluviales. Se identificaron adicionalmente tres fallas importantes por la longitud de su traza: la falla Mazahua (E-W), fallas San Felipe (NW-SE) y falla San Pedro de los Baños (NW-SE).

Desde el punto de vista geológico-ambiental se identificaron algunos peligros geológicos relacionados con la presencia de los escarpes de falla del sistema de fallas de la falla Perales como deslizamientos, grietas y movimientos de reptación de suelo. Estos peligros identificados y el mapa de susceptibilidad por deslizamientos indican que para algunas comunidades como San Isidro Boxipe, Santa Ana Ixtlahuaca, San Pedro El Alto y San Antonio Mextepec toman el carácter de riesgos geológicos, y que en parte fue observado en campo, ya que varios asentamientos habitacionales están sobre los depósitos de deslizamientos activos y se observaron algunos desplantes de construcciones.

Abstract

The Perales fault is in the central part of trans-Mexican Volcanic Belt and belong to the Taxco San Miguel de Allende fault system. In other scale that is not regional the Perales fault is a boundary between the Valle de Ixtlahuaca and Sierra Mazahua and fault is in Ixtlahuaca and San Felipe del Progreso municipalities of State of Mexico. In part the present work is shown the stratigraphic, structural geology and environmental geology characterization of the Perales fault and the main objective being the definition of geological hazard zones due to fracturing and faulting resulting from the geological activity of the fault. Since the fault is an important physiographic expression and influence on the distribution of natural resources in the Ixtlahuaca Valley, and the geology of fault was unknown as well theirs associated geological hazards. To achieve the objective, several methodologies as documentary research, geological photointerpretation, field geology and environmental geology were applied in this study area with the support of the Geographic Information System ARCGIS.

The stratigraphy that occurs in the hanging wall block and footwall block of the Perales fault are Cretaceous rocks belonging to the Xochipala formation (phyllites and schists), Miocene volcanic andesitic-basaltic rocks, andesitic and basaltic Plio-Pleistocene volcanic rocks, several volcanic deposits of Quaternary age, fluvio-lacustrine deposits of the Ixtlahuaca Valley and geyserites and hydrothermal alterations of the Concepción-San Pedro los Baños unit.

Two fault systems of normal faults that belong to the Perales fault were defined in this work. These fault systems are NW-SE and NE-SW. These faults have a nucleus formed by breccias and are associated with slope deposits, colluvium deposits and alluvial fans. Three important faults were also identified by the length of their trace: the Mazahua fault (E-W), San Felipe faults (NW-SE) and San Pedro de los Baños fault (NW-SE).

From the geological-environmental point of view, some geological hazards were identified related to the presence of the fault escarpments of the fault system of the Perales fault, such as landslides, fractures and cracks and soil creep movements. These identified hazards and the landslide susceptibility map indicate that for some communities such as San Isidro Boxipe, Santa Ana Ixtlahuaca, San Pedro El Alto and San Antonio Mextepec they take the character of geological risks, since on this were partly observed in the field and several housing settlements are on the active landslide deposits and some constructions are damaged.

1. INTRODUCCION

1.1 Planteamiento y justificación del problema

La falla Perales, que es el objeto de estudio del presente trabajo, es una estructura geológica regional que se extiende a lo largo de 22 Km aproximadamente, desde San Felipe del Progreso hasta Ixtlahuaca de Rayón. Tiene una orientación preferencial NW-SE (Noroeste-Sureste), con su bloque hundido hacia el NE (Noreste) y una inclinación de más de 70° (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990). Los estudios de peligros geológicos relacionados con la falla son nulos y escasos. El trabajo de Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego et al. (1990) es de carácter regional y trata someramente algunas manifestaciones de grietas, sin embargo, en la falla Pastores y Acambay existen reportes de sismicidad activa y fallamiento activo (Sunye-Puchol et al., 2015) y estas fallas no están muy alejados de la zona de estudio, a unos 18 a 20 Km de distancia.

La falla Perales pertenece al Sistema de fallas de Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002) que es considerado como un sistema de fallas antiguo y de carácter tectónico ya que limita dos elementos geológicos importantes de México la cual es la Mesa Central y el Cinturón de Pliegues y Fallas Inversas de la Sierra Madre Oriental y en este sistema a la altura de Querétaro se ha detectado actividad de algunas de sus fallas (Alaniz-Álvarez et al., 2002). La cercanía de la falla Perales con las fallas Acambay y Pastores (Norini et al., 2010; Langridge et al., 2013) puede sugerir que existen peligros por fracturas y fallas también en la falla Perales, puesto que se ha visto que fallas activas generan peligros directos e indirectos para la sociedad, ya sea por los sismos generados a lo largo de las trazas de falla o por generación de agrietamientos que afectan a infraestructura urbana por ejemplo casos de Morelia y Acambay (Garduño-Monroy et al., 2001; Urbina y Camacho, 1913).

El presente trabajo generará un conocimiento geológico sobre la falla Perales mediante la elaboración de un mapa geológico-estructural para en parte conocer la actividad geológica de la falla perales y luego hacer una delimitación de las posibles zonas susceptibles a peligros geológicos asociados a fracturamiento y fallamientos resultantes de la actividad de la falla. Este trabajo también permitirá generar un conocimiento geológico básico para empezar a comprender la actividad de dicha falla y sus implicaciones en algunos peligros geológicos como sismicidad, agrietamientos y deslizamientos.

Por la falta de estudios geológicos de esta falla, el presente trabajo servirá como base para futuras investigaciones relacionadas a los estudios de peligros geológicos y que se traten en mayor profundidad los temas relacionados de la falla con estudios de recursos hídricos y geográficos adicionalmente este trabajo aportará conocimiento básico de la geología de la Cuenca de Toluca y de la geología de México.

1.2 Hipótesis

La falla Perales es una falla geológica la cual limita a la depresión del Valle de Ixtlahuaca (DVI) y a la Sierra Mazahua y que se extiende a lo largo de 22 Km con una dirección NW-SE; esta falla podría estar activa y los riesgos geológicos como deslizamientos, y agrietamientos que se han documentado escasamente en el Valle de Ixtlahuaca podrían estar relacionados con la actividad geológica de la falla Perales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Generar un mapa geológico-estructural de la zona de falla Perales, mediante el levantamiento cartográfico de campo, para definir zonas de peligros geológicos por fracturamiento y fallamiento resultado de la actividad geológica de la falla.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar el mapa geológico de la falla Perales a escala 1: 50 000 mediante la aplicación de las metodologías de fotointerpretación geológica, geología estructural y geología de campo para obtener la geología básica de la falla.
- Identificar los posibles peligros geológicos que afecten el área mediante el establecimiento de su relación con fallas y fracturas empleando la geología de campo y con apoyo de la herramienta ARCGIS.

1.4 Área de estudio

La falla Perales, es una estructura geológica regional que extiende a lo largo 22 Km aproximadamente (Fig. 1.1), desde San Felipe del Progreso hasta Ixtlahuaca de Rayón. Tiene una orientación preferencial NW-SE (Noroeste-Sureste), con su bloque hundido hacia el NE (Noreste) y una inclinación de más de 70° (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990).

Los principales poblados en la zona de falla son: San Lucas Ocotepéc, San Agustín Mextepec, San Pedro el Alto, San Isidro Boxipe, Santa Ana Ixtlahuaca, La Guadalupana y San Juan de las Manzanas; con sus respectivas comunidades de menor tamaño (Figura 1.1). La zona de estudio se encuentra entre las coordenadas

extremas (al NW y SE) en sistema UTM-Datum WGS84 de: 395282.42 mE, 2183819.91mN y 412802.11mE, 2156538.70mN.

La fisiografía general en la que se encuentra la zona de estudio se llama Sistema Volcánico Transversal. La falla Perales esta comprendida dentro de los municipios de Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso. Estos municipios a su vez se encuentran en la subprovincia fisiografica llamada Lagos y Volcanes de Anahuac que es una región de sierras volcánicas y grandes aparatos individuales que alternan con amplias llanuras. En el mapa de ubicación, el escarpe de la falla Perales representa el límite oeste del Valle de Ixtlahuaca.

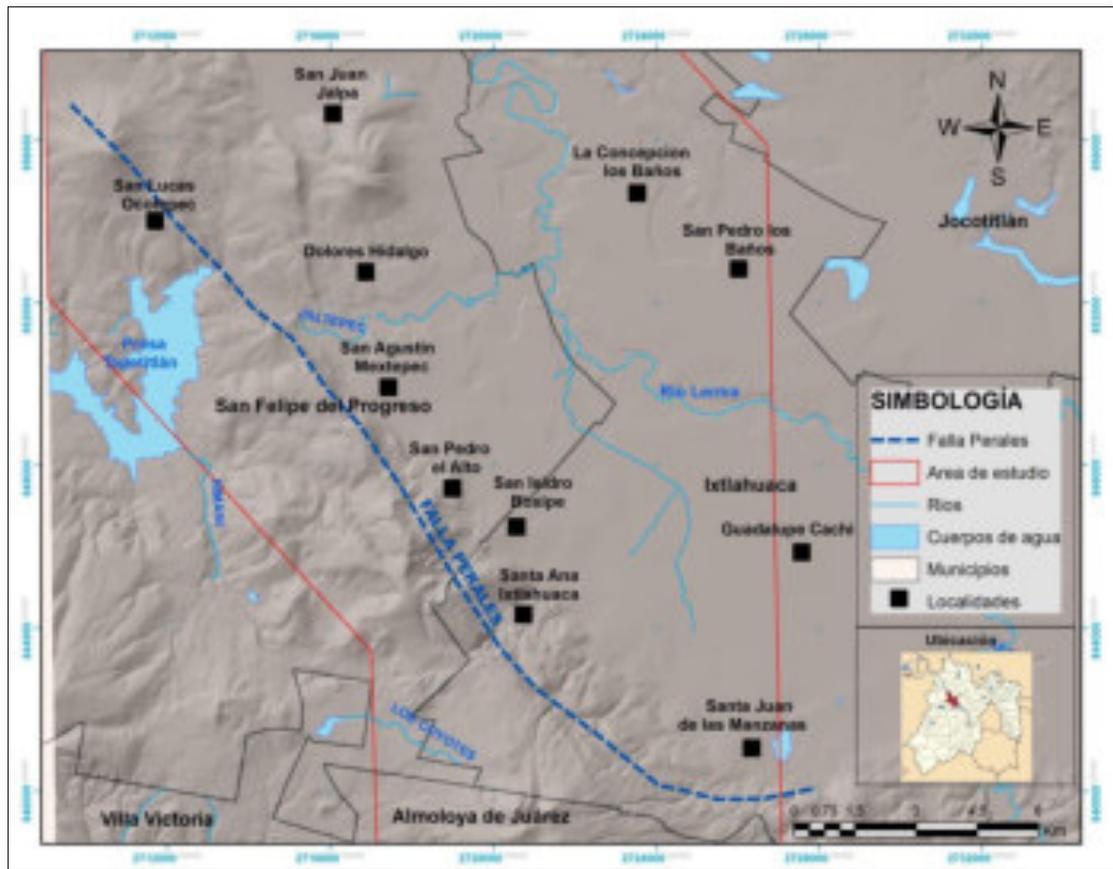


Figura 1.1 - Ubicación de la falla Perales (Elaboración propia).

2. METODOLOGÍA

Para resolver los objetivos planteados y el problema de este trabajo de tesis se emplearon las siguientes metodologías: método científico, investigación documental, fotointerpretación geológica y fotogeología, geología de campo, así como la cartografía geológica y un análisis de susceptibilidad a peligros geológicos usando la herramienta del software ArcGis (Figura 2.1).

2.1 Método científico

El método científico la estrategia que se debe seguir para obtener un resultado; opera con conceptos, definiciones, hipótesis, variables e indicadores que son los elementos básicos que proporcionan los recursos e instrumentos intelectuales con los que se ha de trabajar para construir el sistema teórico de la ciencia, y así lograr el objetivo de la investigación (Gómez-Bastar, 2012).

El método científico consta de varios pasos como son observación, la formulación del problema, hipótesis, experimentación, datos y resultados, comprobación de la hipótesis y conclusiones. En las diferentes etapas de trabajo de esta tesis se hizo uso del método científico. La observación está presente antes de la definición del problema, en las observaciones geológicas de campo y durante la cartografía geológica. La definición del problema implicó detectar que existía un problema relacionado con un contexto de fallas activas en la cercanía de la falla Perales, que pertenece a un sistema de fallas importantes de México como es el Sistema de Taxco San Miguel de Allende como se verá en el marco teórico y que a lo largo de su traza hay poblaciones. La experimentación fue realizada por la naturaleza y en la parte de colecta de datos son los resultados de la experimentación en la geología que consistió en la toma de datos estratigráficos, geológico-estructurales y geológico-ambientales. para la obtención de los datos geológicos y de peligros de la falla Perales para generar la información cartográfica correspondiente a los temas (Tabla 1).

- ❖ Los trabajos de campo se generaron mediante el uso de técnicas geológicas de levantamiento como lo son las características estructurales y estratigráficas.
- ❖ Los trabajos de campo se refieren a la preparación, recopilación y análisis de la información obtenida tanto de otras fuentes así como las obtenidas en campo mediante la observación y el análisis de los sitios.

Tabla 1.- Pasos del método científico y sus relaciones este trabajo

| Método científico | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Fase | Modo de trabajo |
| Formulación del problema | Trabajo de gabinete |
| Definición de la hipótesis | Trabajo de gabinete |
| Observación | Trabajo de campo y gabinete |
| Experimentación | Trabajo de campo |
| Reunir datos | Trabajo de campo y gabinete |
| Interpretación de los datos | Trabajo de campo |
| Comprobación de la hipótesis | Trabajo de campo y gabinete |
| Inferencia conclusiones | Trabajo de gabinete |

2.2 Investigación documental

La investigación es el proceso organizado y coherente de utilización, análisis y síntesis de la información científica sobre el objeto de la investigación (Díaz-Duque, 2012).

La investigación documental se manifiesta en dos momentos importantes de la investigación científica, antes de su inicio y durante su ejecución. La investigación documental es una parte esencial de un proceso de investigación científica en

donde se observa y se reflexiona sistemáticamente usando diferentes tipos de fuentes. Las fuentes documentos que se usaron fueron bibliográficas, iconográficas físicas y digitales. Díaz-Duque (2012) menciona que los tipos de fuentes de investigación documental son: reseñas, revistas, índices bibliográficos, revistas científicas, memorias de eventos científicos, publicaciones seriadas, documentos no publicados, libros o monografías, documentos técnicos, compilaciones, manuales y guías. Para fines de este trabajo las fuentes utilizadas fueron trabajos próximos a la zona, tales como libros, artículos, mapas (geológicos y topográficos), ortofotos y documentos de otra especie. En cartografía topográfica se empleó la carta topográfica E14A27 a escala 1:50000 de INEGI correspondiente a la zona de Ixtlahuaca, así como las ortofotos escala 1:20000 con la clave E14A27A, B, D y E. La recopilación hizo para adquirir todo el material disponible del sitio de estudio para poder conocer y generar hipótesis de la zona en la que se encuentra la falla Perales, al igual que estudios similares al tema de estudio.

A través de este método y sus técnicas se pudo obtener un panorama general de la zona de estudio, es decir, la recopilación de información referente a la falla Perales como su geología regional, relieve y geomorfología, antecedentes de peligros geológico y demás aspectos que pueden complementar la información.

2.3 Fotogeología y fotointerpretación geológica

La fotogeología es una ciencia y parte de la geología que se especializa en la interpretación de estructuras geológicas que afloran en la superficie de la Tierra y en un inicio solo empleaba fotografías aéreas, pero ahora tiene varias fuentes como son las imágenes de satélite (Guerra-Peña, 2003). El objetivo principal de la fotogeología fue la fotointerpretación geológica para después realizar la verificación puntual de campo fue una herramienta muy útil para la interpretación de estructuras geológicas de la zona como lineamientos estructurales y contactos litológicos inferidos a partir de cartas topográficas, ortofotos e imágenes de satélite de Google Earth. Los criterios empleados en la fotointerpretación fueron los inherentes a

propiedades a la ortofoto, imagen de satélite como tonos, texturas, sombras, formas, tamaños, y relaciones con objetos; otras propiedades son formas topográficas, posiciones, pendientes y alineaciones; otros fueron las propiedades relacionadas con erosión y drenaje, y por último suelo y vegetación (Guerra-Peña, 2003).

Los tipos de estructuras geológicas como fracturas, fallas y volcanes fueron interpretados adicionalmente a partir de las curvas de nivel, en la caso de laderas, escarpes y valles; La separación entre curvas de nivel en mapas topográficos se usó para interpretarse como planicies o escarpes de falla.

A partir de la fotointerpretación geológica se generó una primera cartografía geológica interpretada en gabinete que después fue precisada durante la geología de campo. Esta cartografía geológica de gabinete contenía contactos litológicos, lineamientos estructurales, estructuras volcánicas y zonas de planicies y escarpes.

El mapa geológico de gabinete sirvió de guía para puntos de muestreo y de análisis detallado de campo. Adicionalmente este mapa ayudo a ubicar las poblaciones y/o carreteras por las cuales se pudiese acceder a los diferentes sitios.

2.4 Geología de campo

Para efectos de este trabajo de tesis se ocuparon las siguientes herramientas:

- ❖ Brújula tipo brunton: Herramienta que sirve para el levantamiento de datos estructurales en campo de los afloramientos rocosos (rumbo, echado y pitch) y la orientación tanto de los esquemas geológicos como la orientación en terreno de los usuarios.
- ❖ GPS tipo Garming: Dispositivo importante para la ubicación de los puntos muestreados en campo sobre las cartas topográficas y geológicas. Para este trabajo las configuraciones geográficas del GPS fueron: coordenadas UTM con DATUM WGS84 para la zona de México.

- ❖ Pica: Instrumento importante para la extracción de muestras de roca de los afloramientos para un análisis de gabinete, básicamente consiste en golpear la roca para extraer un fragmento de la misma.
- ❖ Regletas: Son una variación de reglas muy útiles para el mapeo geológico por sus características, ya que tienen diferentes escalas, cuentan con un compás hecho para el mapeo geológico tanto en gabinete como en campo.
- ❖ Cartas topográficas: Como se mencionó anteriormente en el apartado de fotogeología tiene muchos usos, sin embargo en campo sirve para ubicar los puntos sobre ella.

Antes de la recolección de datos geológicos en campo se elaboró el mapa geológico preliminar sobre una base topográfica (trabajo de gabinete) a partir de fotointerpretación geológica y se realizó la selección de puntos para el levantamiento de información por zonas, consecuentemente en campo se hicieron recorridos y finalmente se determinaron puntos de muestreo sobre los sitios en los cuales haya afloramientos geológicos que haya que analizar y ubicar, casas con fracturas estructurales y deslizamientos ocurridos. La ubicación de puntos de identificación en campo se generó a través de un dispositivo GPS tipo Garmin.

En el mapeo geológico se recabaron datos de los afloramientos geológicos. Estos afloramientos se ubicaron con coordenadas y elevación (msnm) a través del GPS. En el campo se generaron varios esquemas de los afloramientos, los cuales se orientaron con ayuda de la brújula. Posteriormente se realizó un análisis geológico del afloramiento de roca, como el tipo de roca y relaciones de corte y la interpretación de eventos que se pudieron haber generado en el sitio para dar origen a lo que se está observando. En el tipo de roca cuando hubo duda se extrajo una muestra de roca de un tamaño promedio de 15x10 cm mediante el uso de un martillo de geólogo. También se identificaron estructuras de deformación como fallas y fracturas; a estas estructuras se les tomaron las medidas de rumbo, echado y pitch, esto para ser ubicadas sobre el mapa geológico. Algunos datos estructurales se

colocaron en hojas de papel herculene (cuadrulado y escalado) para tener zonas de detalle cartografiadas.

2.5 Identificación y descripción de los peligros geológicos

La identificación y descripción de peligros geológicos se basó en la integración y análisis de los resultados de la aplicación de las anteriores metodologías como investigación documental, fotointerpretación geológica, geología de campo y la cartografía geológica-ambiental final. En esta parte se tomó en cuenta rasgos geológico-estructurales, geomorfológicos básicos como agrietamientos en las casas de las poblaciones cercanas, deslizamientos, procesos de reptación, así como algunas consultas ciudadanas con los pobladores.

2.6 Mapa de peligros geológicos

A partir de la etapa de la identificación de los peligros geológicos se realizó una integración y análisis de los resultados para establecer con base en criterios geológico-ambientales y geológico-estructurales las zonas susceptibles a la generación de un peligro geológico relacionado a la actividad geológica y/o expresión geomorfológica de la falla Perales que pudiese afectar a la población.

Para la generación del mapa se utilizó el software ArcMap en su plataforma ArcGis a través de un Análisis Multicriterio para la realización del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, el uso de este método es muy útil, ya que a través de este se pueden superponer diferentes capas de información (datos vectoriales y raster) referente a los temas de deslizamientos. Para fines delimitación de peligros por agrietamientos se utilizó el método de superposición de capas.

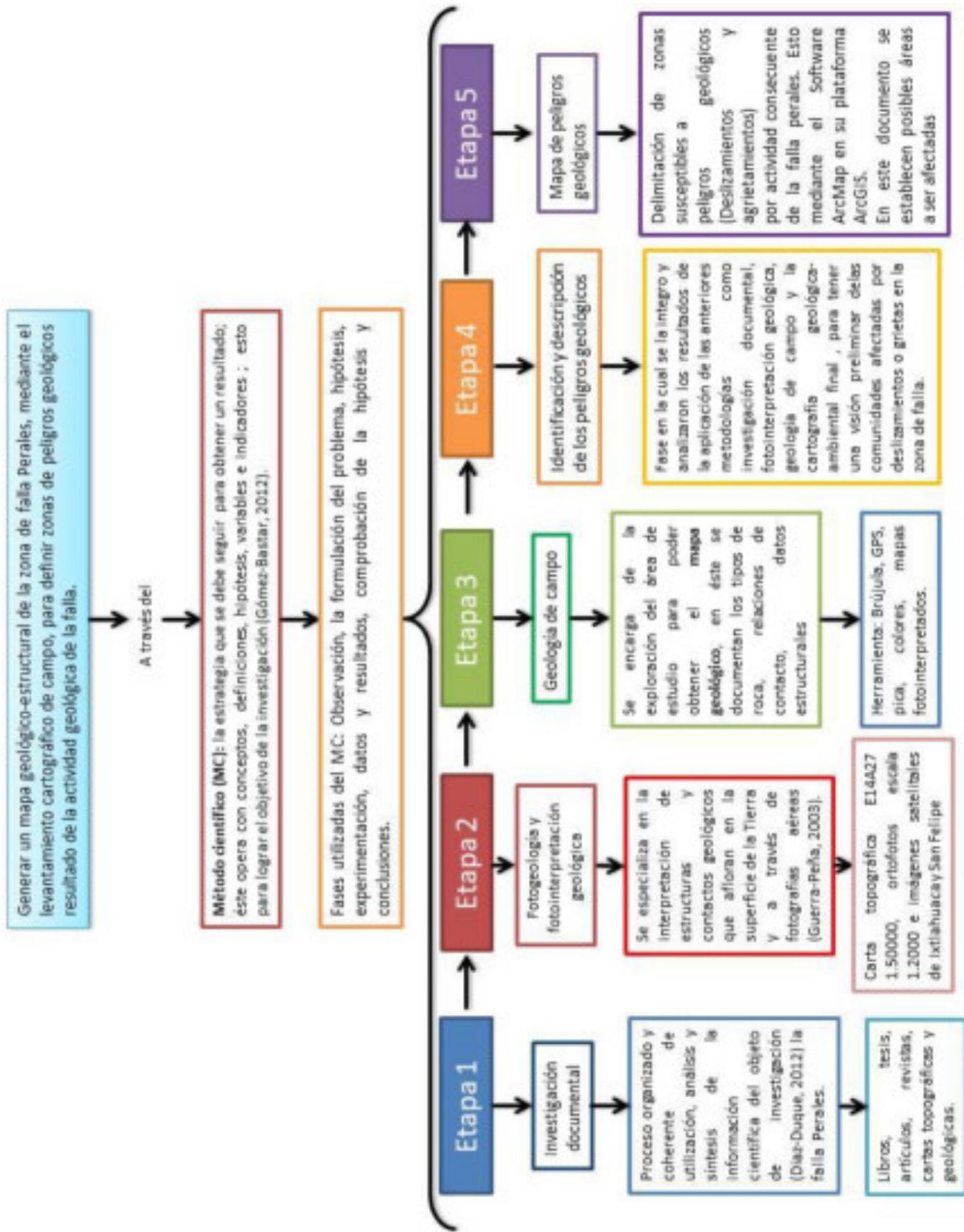


Figura 2.1 - Esquema metodológico de la realización de la tesis.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Fallas mayores en el área central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

La Faja Volcánica Transversal Mexicana (FVTM) es una provincia geológica de actividad tectónica reciente, la cual tiene 1000 km de longitud y una amplitud que varía entre los 80 y 230 km (Gómez-Tuena et al., 2005). La actividad magmática de la FVTM ha estado ligada con fallamiento y se han reportado algunas edades de su actividad geológica: Cuaternario (Demant, 1978), Plioceno tardío (Cantagrel y Robin, 1979, en Gómez-Tuena et al., 2015), Plioceno temprano (Nixon et al., 1987, en Gómez-Tuena et al., 2015; García-Palomo et al., 2008).

En el sector central de la FVTM, se han documentado dos sistemas de fallas mayores, que es el Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez et al., 2002) y el Sistema Morelia-Acambay (Jonhson y Harrison, 1990). El SFTSMA va desde San Luis Potosí hasta Taxco en el Estado de Guerrero y contiene fallas N-S con una actividad de fallamiento desde por lo menos el Mioceno (Alaniz-Álvarez et al., 2000). En este sector se ha documentado actividad volcánica y de fallamiento de edad Plioceno-Cuaternario (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego et al., 1990; Norini et al., 2006). Muchos estudios, relacionados a fallamiento geológico, se hicieron en el denominado Sistema Morelia-Acambay o también conocido como zona de fallas Chapala-Tula (Jonhson y Harrison, 1990; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Suter y Jonhson, 1992) (Figura 3.1). Otros estudios de fallamiento se hicieron en la FVTM en una franja de ~30 km de ancho y ~240 km en la porción Oeste y central de la (Jonhson y Harrison, 1990) indicaron la actividad fallas de dirección WSW-ENE las cuales son responsables de las depresiones tectónicas de Zacapu, Cuitzeo, Morelia y Acambay. Las relaciones entre vulcanismo y fallamiento de la región central de la FVTM indican que las fallas E-W empezaron su actividad posiblemente en el Plioceno temprano con movimientos laterales a transtensivos, para luego volverse progresivamente más extensionales (Ferrari et al., 1990; Suter et al., 1995; Aguirre-Díaz y McDowell,

2000). En la parte oriental del Sistema Morelia-Acambay se caracteriza por una estructura de tipo graben asimétrico definido por las fallas Epitacio Huerta y Acambay-Tixmadeje y las fallas Venta de Bravo y Pastores (Szynkaruk et al. 2009). La falla Perales se ha relacionado con el SFTSMA con base en su orientación y su ubicación (Alaniz-Álvarez et al., 2002).

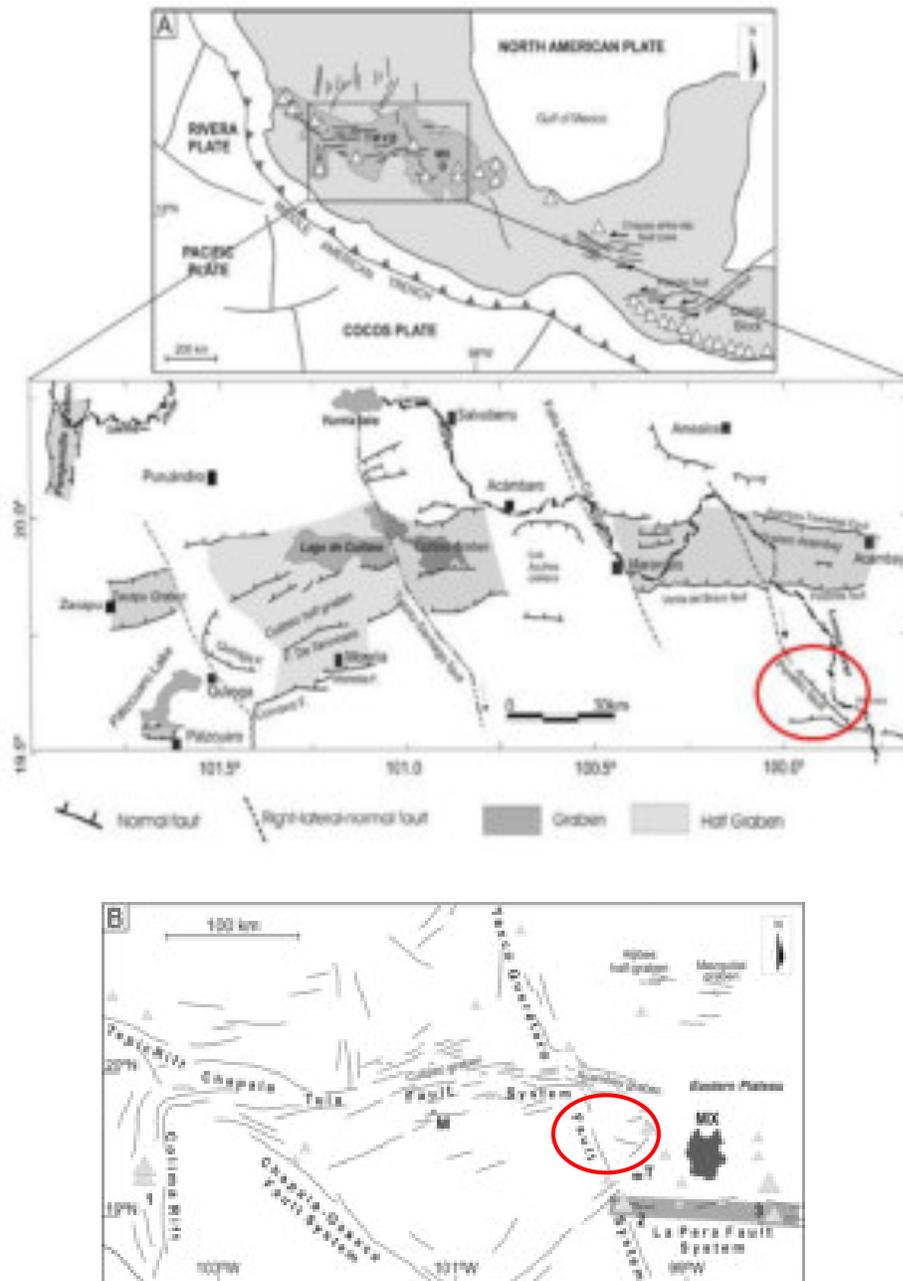


Figura 3.1 - Ubicación de la falla Perales, A) en el contexto de los sistemas de fallas de la FVTM (Norini et al., 2016) y B) ubicación de la falla Perales (ovalo rojo) en el sistema de fallas Taxco-

Querétaro ahora denominado SFTSMA (Alaniz-Álvarez et al., 2002) y otros sistemas de falla cercanos (Garduño-Monroy et al., 2009).

3.2 Estratigrafía volcánica de la región de Ixtahuaca.

La estratigrafía de la región de Ixtlahuaca, de acuerdo con la carta geológica de IFOMEGEN (1995) las rocas más antiguas son filitas pelíticas cretácicas con protolitos de caliza arcillosa, lutita, arenisca y rocas volcanosedimentarias máficas; a estas le sobreyacen andesitas y dacitas del Mioceno e ignimbritas que se correlacionan con la Formación Las Américas que aflora en Tlalpujahuá, Michoacán y El Oro en el Estado de México, y que es considerada del Plioceno (Corona-Chávez et al., 2017), posteriormente aparecen basaltos y andesitas de la sierra Mazahua que podrían ser del Plioceno. En el Valle de Ixtlahuaca se han descrito y fechado depósitos volcánicos que han sido identificados como productos del volcán Jocotitlán con edades del Pleistoceno medio y del Holoceno (Salinas-Sánchez, 2013). En el valle también se han reconocido depósitos lacustres con intercalaciones de piedra pómez que se han denominado Formación Ixtapantongo del Pleistoceno (Sánchez-Rubio, 1984). Los depósitos más recientes dentro del valle son depósitos volcánicos y aluviones del Holoceno (INFOMEGEN, 2009; Salinas-Sánchez, 2013). De acuerdo a Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego (1990) los estratos superiores están compuestos principalmente de sedimentos lacustres pliocénicos-cuaternarios del valle de Toluca, estos sobreyacen rocas miocénicas de la Sierra de las Cruces (Hasenaka y Carmichel, 1985; en Johnson y Harrison, 1990) y a su vez esas rocas se encuentran sobre una plataforma de calizas del Cretácico (Fries, 1960 en García-Palomo et al., 2008).

3.3 Las fallas en la región de Ixtlahuaca

En la región de Ixtlahuaca confluyen fallas que pertenecen al Sistema de Fallas de Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez et al., 2002), las fallas de la Sierra de las Cruces (SC) (García-Palomo et al., 2008) y por último las fallas del Sistema Morelia-Acambay (Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990) (Figura 3.2). La falla Perales representaría al SFTSMA presente en la región de San Felipe del Progreso-Ixtlahuaca, con una orientación NW-SE (Alaniz-Álvarez et al., 2002) sin embargo existen pocos datos geológicos de esta falla, su escarpe alcanza una elevación vertical de ca. de 500 m con respecto al valle. La falla Ixtlahuaca integrante de las fallas de la Sierra de las Cruces de acuerdo a García-Palomo et al. (2008); Esta falla tiene ~30 km de longitud y ~ 6 km de ancho está constituida por fracturas paralelas orientadas E-W, que parecen enlazar las fallas de la SC con la falla Perales. En general, la falla en planta es cóncava hacia el norte, en la misma dirección del buzamiento según García-Palomo et al. (2008). Ortiz-Pérez y Bocco (1989) describen una serie de bloques y tres sistemas de fallas E-W, NE-SW y N-S con base en un estudio morfotectónico en la región de Ixtlahuaca.

Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, (1988) reconocen que la falla Ixtlahuaca se constituye de un conjunto de fallas normales con dirección E-W perpendicular a la Sierra de las Cruces, además de la existencia de un sistema de fallas y fracturas con direcciones Noreste (NE), que han estado activas desde el Plioceno; su origen lo atribuyen a esfuerzos compresivos y tensionales.

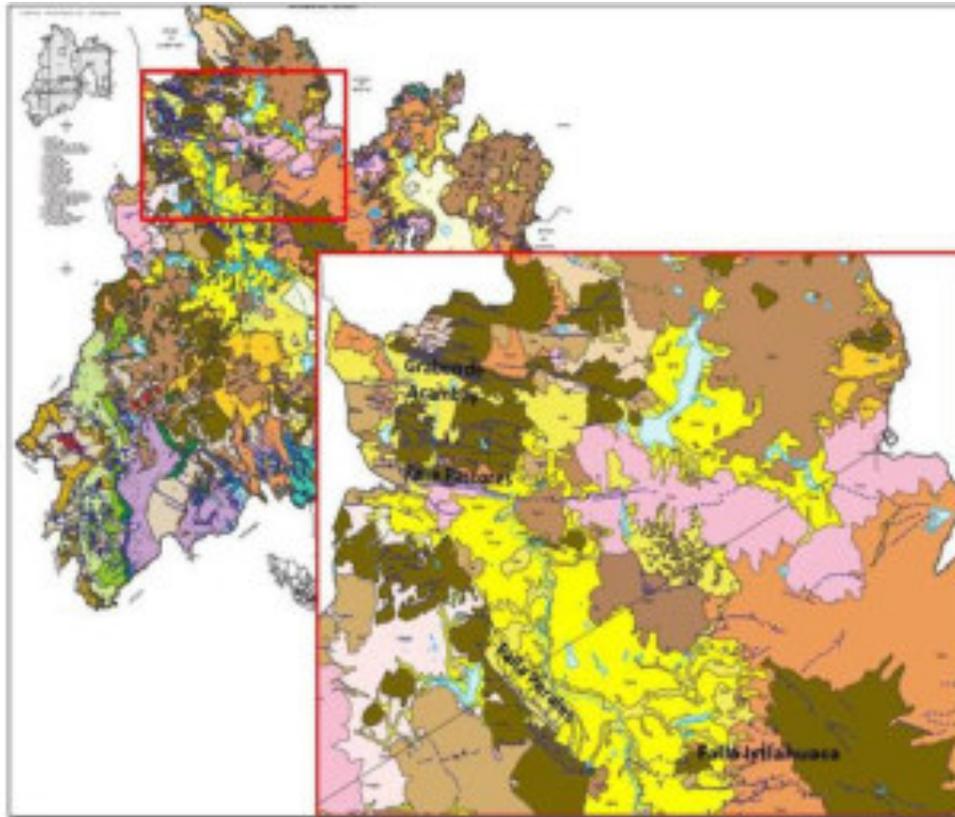


Figura 3.2 - Mapa geológico del Estado de México con ubicación de la falla Perales, Pastores y graben de Acambay (IFOMEGEM, 1995).

3.4 Peligros geológicos asociados a fallas

El centro y sur de México está ligado a una tectónica activa debido a la subducción de la placa de Cocos por debajo de la Norteamérica (Martinez-Lopez y Mendoza, 2016) y que condicionan la actividad volcánica y de fallamiento a lo largo de Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari et al., 2000). Existen numerosos casos de fallas activas a lo largo de la FVTM y que afectan a poblaciones e infraestructura civil en ciudades como Morelia, Querétaro, y Toluca (Garduño-Monroy et al., 2001; Almazán-Vázquez, 2017). Algunas de estas fallas tienen asociada actividad sísmica, un caso por ejemplo es el sistema de fallas de Acambay que es el límite norte del Valle de Ixtlahuaca y que presenta actividad sísmica a lo largo de la falla Pastores (Sunye-Puchol et al., 2015). Los peligros sísmicos son un tipo de peligros geológicos a los que está expuesto México. Tanner y Sheppard (1999) por ejemplo,

son autores que han generado una gran cantidad de estudios sobre el peligro sísmico en el país.

Los agrietamientos y facturas son un tipo de peligro geológico asociado a la dinámica de una falla activa, estas estructuras se ven reflejadas directamente en la infraestructura (edificaciones) y el terreno, un ejemplo en México el estudio en valle de Aguascalientes donde se reportó un importante número de comunidades afectadas por fracturas y fallas, en donde se incluye la ciudad de Aguascalientes (Hernández-Marín et. al., 2015)

3.5 Antecedentes de peligros geológicos en la falla Perales

Los estudios de peligros geológicos relacionados con la falla Perales son escasos. En el trabajo de Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego (1990), que es de carácter regional, y trata someramente algunas manifestaciones de grietas, las cuales fueron detectadas en las cercanías de la población de Ixtlahuaca en el año de 1980 y que afectaron algunas casas. Según Aguilar-Contreras, (1980) en Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego et al. (1990), se hizo un reconocimiento para analizar el terreno y establecieron una posible relación con una de las fallas de la zona con base en la orientación del agrietamiento que resulto seguir a la tendencia general en orientación de las estructuras regionales como por ejemplo la falla Perales.

En el norte de la falla Perales a una distancia de ca. 18 km, en la falla Pastores del sistema de fallas Acambay con orientación E-W, hay reportes de actividad sísmica recientes (Sunye-Puchol et al., 2015) y prueba de ello es el sismo de 1912 con magnitud 6.9 y epicentro en Acambay (Urbina y Camacho, 1913; Suter et al., 1996).

En la región de Acambay se han reconocido deslizamientos hacia los escarpes de fallas activas en los hombros del graben, como en la falla Pastores y en la falla Acambay que amenazan a poblaciones e infraestructura civil (Norini et al., 2013; Langridge et al., 2013).

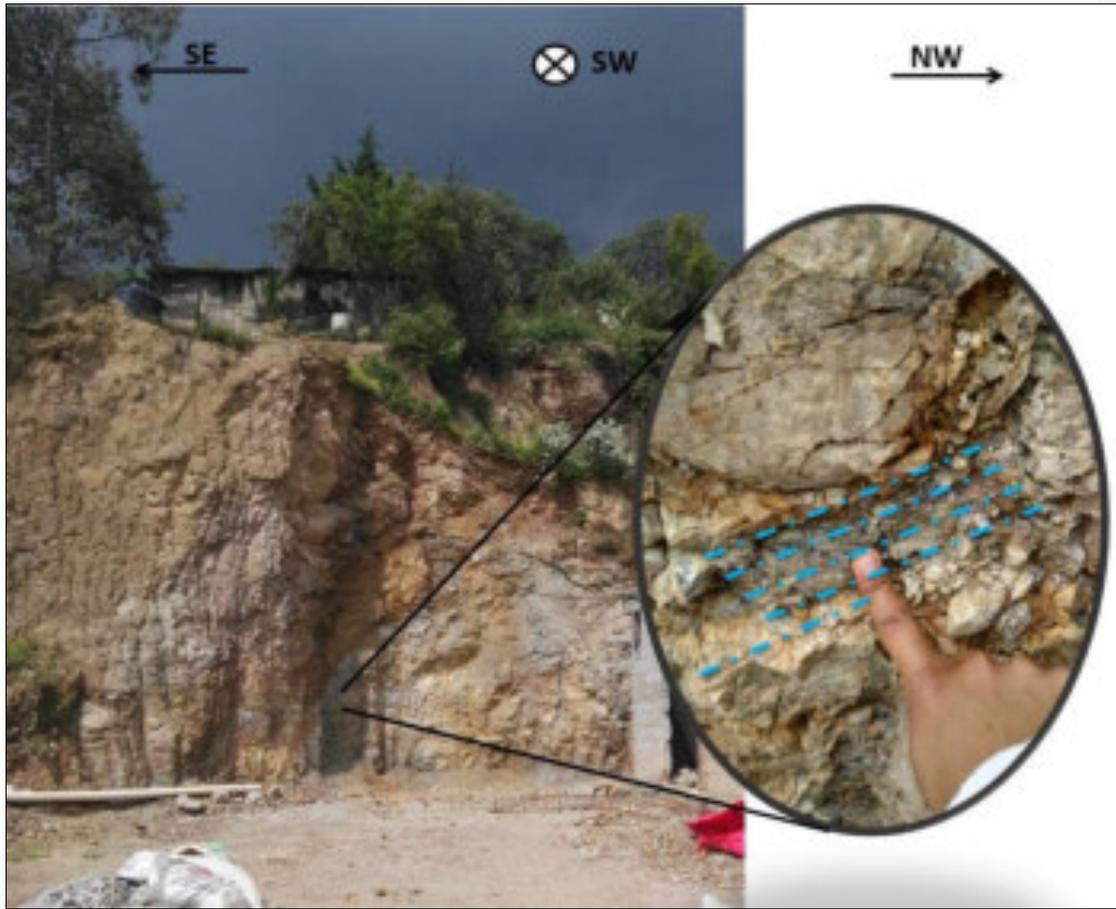


Figura 4.2 - Filitas pelíticas del cretácico, ubicadas al N-W de la comunidad San Pedro el Alto, las cuales presentan una foliación con un metamorfismo de medio grado.

En este trabajo la unidad está constituida de filitas a esquistos pelíticos con clorita, muscovita y cuarzo. Los protolitos fueron lutitas, limolitas y areniscas. Algunas areniscas pudieron ser grauvacas.

En este afloramiento también se observó a rocas metavolcánicas ácidas foliadas. El afloramiento de filitas pelíticas presenta hidróxidos de hierro y limonitas. Las filitas están cortadas por algunos diques riolíticos que no están foliados y que se describen más adelante.

La estructura en las filitas y esquistos es una foliación definida por micas y cuarzo con metamorfismo de bajo grado. La foliación tiene variabilidad en el echado ya que

se presenta plegada (Figura 4.3). La unidad metasedimentaria se encuentra en contacto por falla con rocas volcánicas del Cenozoico y en ocasiones se observó debajo de derrumbes del escarpe de la falla Perales. La edad es considerada en la cartografía de INFOMEGEM (2009) del cretácico, y en Elias-Herrera (1993) la considera en el rango de Cenomaniano tardío a Turoniano por su posición estratigráfica con otras unidades mesozoicas de la región de Arcelia y Tejupilco. En este trabajo la unidad se correlaciona con afloramientos semejantes en Santa Ana Nichi y en el distrito minero de El Oro y Tlapujahua (Michoacán). En otras partes del estado de México se han descrito afloramientos similares en litología, como en el sur del estado en donde se denomina formación Xochipala; otros afloramientos están al oeste y suroeste del Estado de México, en municipios de Donato Guerra y Valle de Bravo. Estas rocas desde el punto de vista tectónico pertenecen al Terreno Guerrero (Centeno-García, 2018).

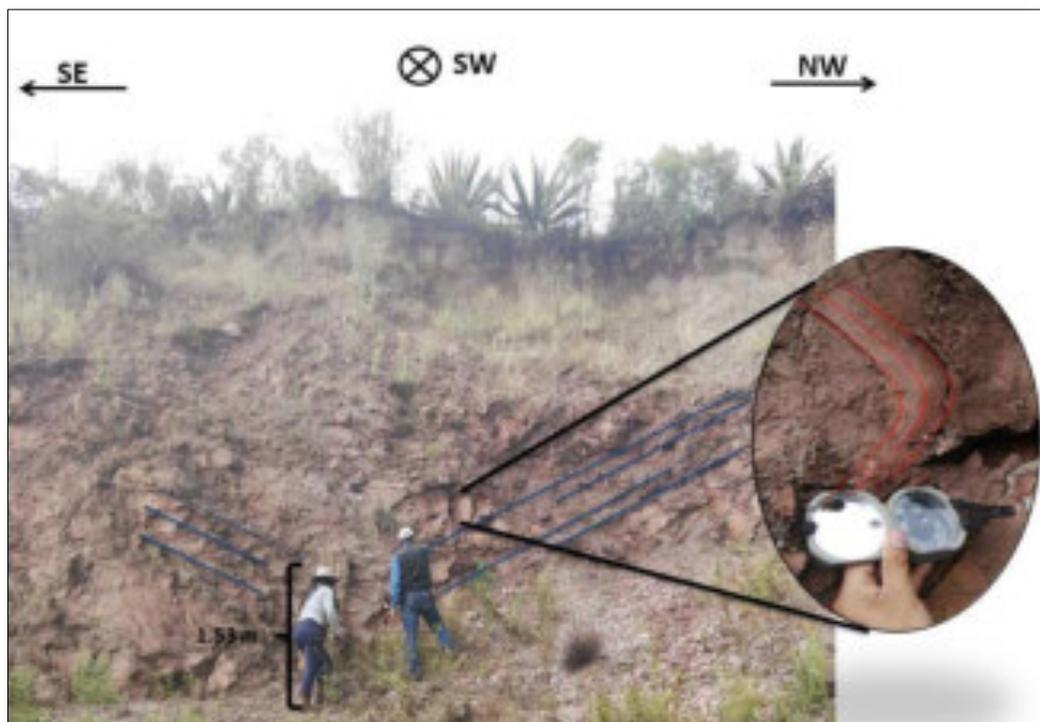


Figura 4.3 - Filitas pelíticas del cretácico inferior, ubicadas al N-W de la comunidad San Pedro el Alto, en el afloramiento se pueden apreciar dos lineaciones preferenciales (líneas azules) en el cual a su vez también presenta micropliegues (zoom con líneas rojas).

4.2 Oligoceno-Mioceno

4.2.1 Vetas de cuarzo y diques riolíticos de San Pedro el Alto

En este trabajo se propone el nombre de vetas de cuarzo y diques riolíticos San Pedro El Alto para vetas de cuarzo y diques riolíticos que cortan a las Filitas pelíticas de la Formación Xochipala. Estas unidades representan una ubicación muy puntual en la zona de estudio. Las vetas están compuestas de cuarzo con pirita de espesores de 1 cm a 5 cm que tienen pirita con oxidación supergénica; estas vetas cortan a las filitas pelíticas y a los diques riolíticos. El dique riolítico presenta una textura pórfidica con fenocristales de cuarzo y feldespato, y presenta argilización con fracturas rellenas de limonitas (Figura 4.4). La edad relativa de estas vetas y diques puede ser Cenozoica ya que cortan al Cretácico y no están foliados. En este trabajo se correlaciona la presencia de este hidrotermalismo con la vetas hidrotermales del Oro y Tlalpujahuá que son del Oligoceno (Camprubí y Albinson, 2006).

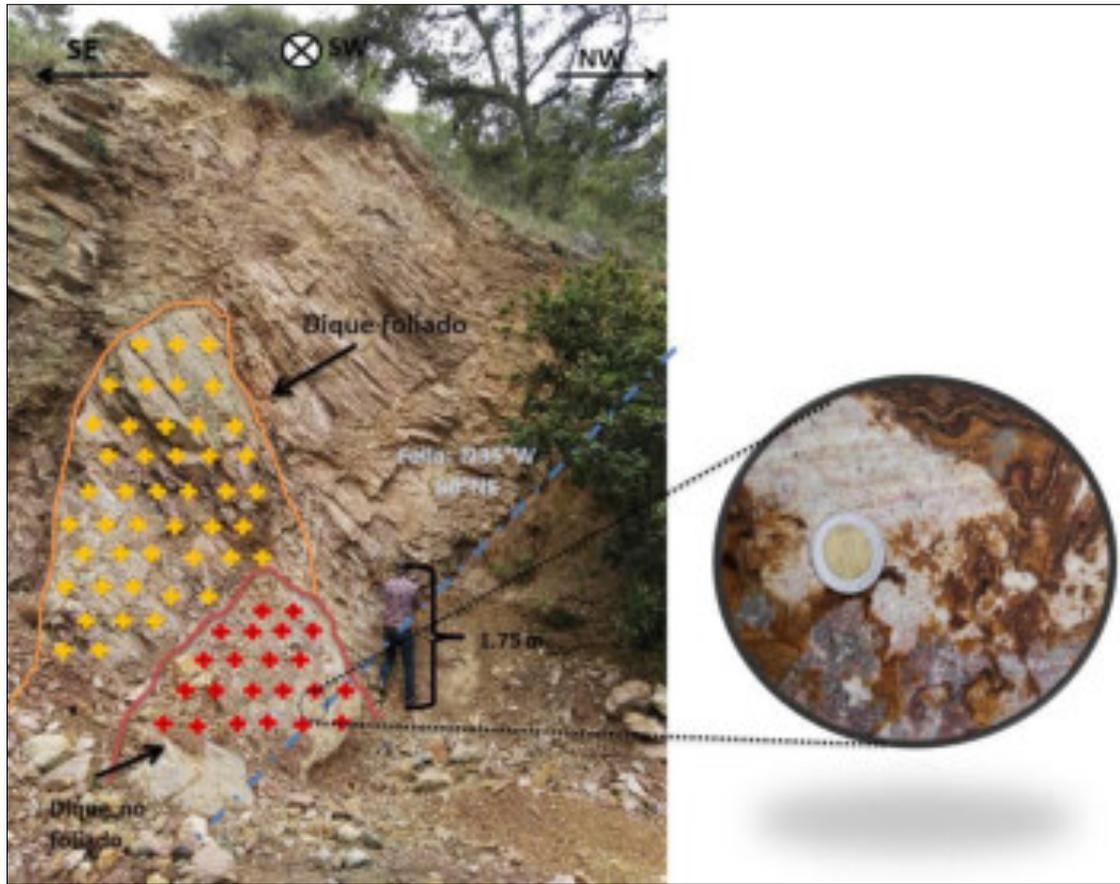


Figura 4.4 - En la imagen se puede apreciar el dique-falla de composición riolítica que intruciona las rocas cretácicas (foliadas) y el cómo en la parte superior influye en el cambio de dirección de estas. En el zoom de la derecha se puede apreciar compasión riolítica con mineral de limonita, también se puede ver el dique foliado.

4.2.2 Ignimbrita San Miguel Yuxtepec

La Ignimbrita fue denominada y encontrada en el Ejido de San Miguel Yuxtepec en el cerro del Águila por Colín-Rubio en el 2018, la cual se extiende de San Miguel hasta el oriente de la comunidad San Juan de las Manzanas al norte del cerro La Venta. Las ignimbritas que afloran en el Ejido de San Miguel Yuxtepec presentan un color rosa intenso, con una estructura eutaxítica en una matriz vítrea y una estructura soldada (Colin-Rubio, 2018).

Las ignimbritas en el Encino del poblado de San Juan de las Manzanas aparecen debajo de las rocas volcánicas del volcán la Venta, y presentan basculamiento con gran presencia de fracturas y fallas, tiene una textura piroclástica con piedra pómez de colores blancos y líticos volcánicos en una matriz de ceniza volcánica (Figura 4.5).

La edad relativa que se le ha asociado es Oligoceno-Mioceno, ya que subyacen a derrames y flujos de lava andesítica del volcán la Guadalupeana y la Venta, considerados y descritos en este trabajo más adelante y cuya edad es considerada de Mioceno-Plioceno. En la Presa de Tepetitlán al extremo noroeste de la falla Perales (Ver mapa geológico en anexos) y en el bloque levantado (Bloque del bajo) afloran ignimbritas que se han correlacionado con las ignimbritas América de 4 Ma y que se han denominado El Capulín (Mioceno-Plioceno) (Corona-Chávez et al., 2017) y se ha postulado la posible existencia de una caldera denominada Mazahua hacia el poniente de la presa Tepetitlán (Anguita et al., 1991) que se infiere pueda ser de edades de entre 5 y 4 Ma (Salinas-Sánchez, 2013) que en este trabajo no se descarta la posibilidad de que la ignimbrita San Miguel Yuxtepec pueda también en parte ser del Mioceno-Plioceno.

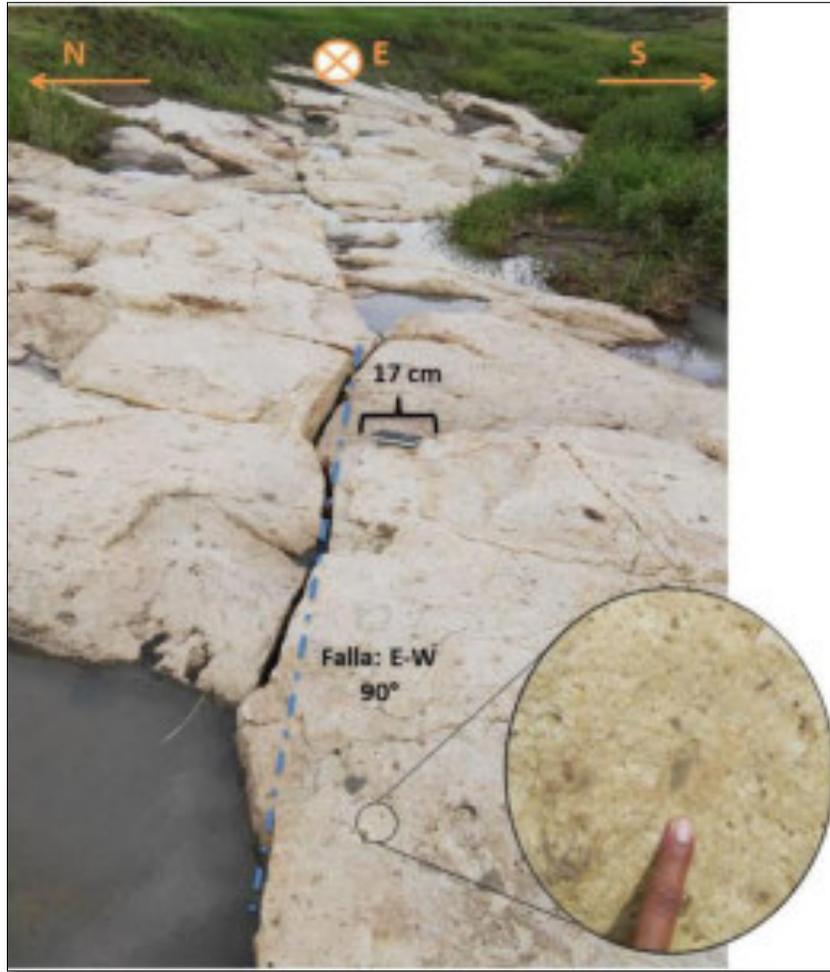


Figura 4.5 - Ignimbrita San Miguel Yuxtepec, afloran en un arroyo en la comunidad El Encino; en el afloramiento se puede ver que es una ignimbrita compactada la cual esta fallada y fracturada.

4.3 Mioceno

4.3.1 Andesitas-Basaltos Santa Ana Ixtlahuaca

Las andesitas-basaltos de Santa Ana afloran en el escarpe de la falla Perales. La carta geológica del Estado de México (INFOMEGEN, 2009) los considero como derrames de características andesitas-basálticas de una edad cercana al Mioceno temprano. En el inventario físico de recursos minerales del municipio de Ixtlahuaca (SGM, 2007) describen a estas rocas como andesitas basálticas que afloran en gran parte de la sierra Mazahua.

En este trabajo se estudiaron los afloramientos que se encuentran en la localidad de Santa Ana Ixtlahuaca. En este lugar se describieron como derrames andesíticos y basálticos (Figura 4.6). Las andesitas presentan textura afanítica y en ocasiones porfídica con fenocristales de plagioclasa. Estas andesitas y basaltos presentan estructuras masivas y derrames de gran espesor alcanzando cerca de 10 m las unidades de flujo. Hacia la base y la cima de algunas unidades de derrame se pudieron observar diaclasas de enfriamiento, y en algunas localidades a lo largo del escarpe de la falla Perales se observaron diaclasas columnares.

La edad considerada para estas andesitas y basaltos de Santa Ana es el Mioceno ya que se encuentran sobreyacidas por la ignimbrita El Capulín hacia el norte del escarpe de la falla Perales que ha sido fechada en ca. 4 Ma (Corona-Chávez et al., 1991) y por varios depósitos volcánicos de volcanes de la zona de San Felipe del Progreso y Atlacomulco que se describen adelante y que son considerados del Plioceno-Pleistoceno.

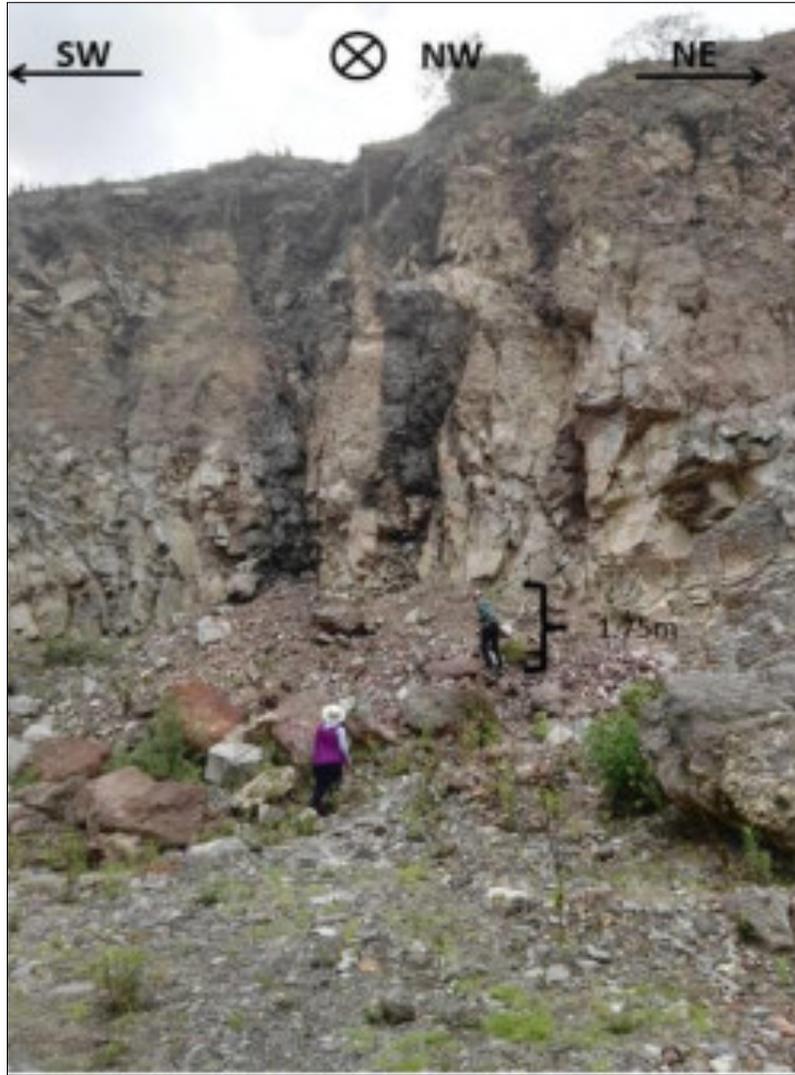


Figura 4.6 - Banco de material con derrames de andesita ubicado en la localidad de Santa Ana Ixtlahuaca.

4.3.2 Depósitos Piroclásticos Perales

Los flujos piroclásticos de Perales tienen una edad que ronda los 3.2 m.a, en campo se ven como depósitos en flujo ricos en pómez acompañado de ceniza (Figura 4.7), también se ven fracturados y a lo largo del pie de la Falla Perales, se encuentran cubiertos por derrames de las andesitas-basálticas de Santa Ana, la edad que se retomó como se mencionó anteriormente es a 3.2 m.a formados posiblemente antes de la cierra mazahua por la relación con las unidades volcánicas emplazadas. A lo largo de todo el pie de la falla se pueden observar estos flujos, por la carretera Ixtlahuaca-San Felipe del Progreso.

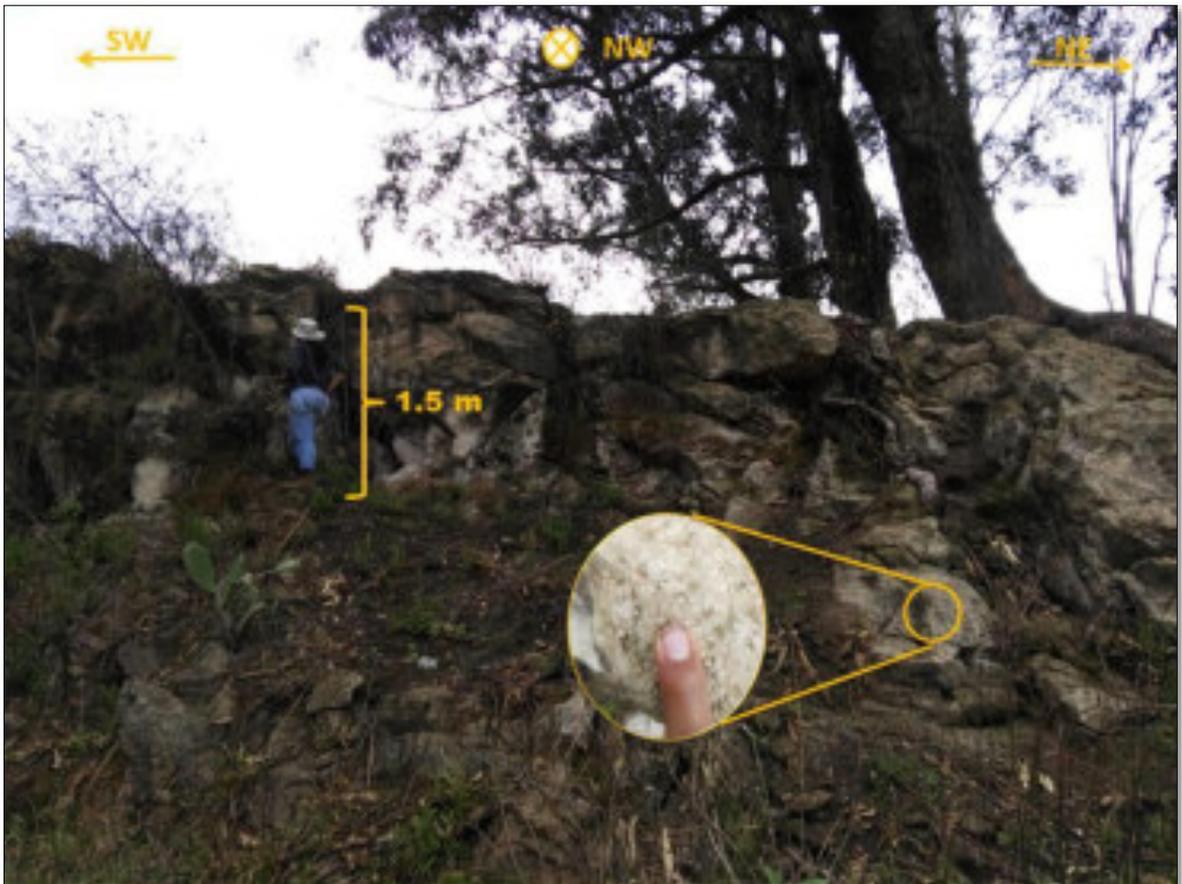


Figura 4.7 - Afloramiento de flujos piroclásticos de pómez y ceniza pertenecientes a los Depósitos Piroclásticos Perales, ubicados en la entrada a Santa Ana Ixtlahuaca.

4.4 Plioceno-Cuaternario

4.4.1 Ignimbrita de la caldera “El capulín”

La ignimbrita el capulín fue definida como una roca piroclástica originada a partir de una estructura volcánica con vulcanismo ácido e intermedio denominada “Caldera El Capulín” en el sur del distrito Minero de Tlalpujahua-El Oro (Corona-Chávez et al., 1991; De la Teja-Segura et al., 1999) y que se ha considerado de una edad ca. a 4 Ma (Corona-Chávez et al., 1991; Hernández-Bernal et al., 2015).

En este trabajo la ignimbrita aflora en las cercanías de la Presa Tepetitlán al noroeste de la falla Perales y cerca de la localidad de San Jerónimo Bonchete (Ver mapa geológico). La ignimbrita presenta una textura piroclástica con matriz de ceniza volcánica y fragmentos líticos.

4.4.2 Unidad Concepción-San Pedro los baños

La unidad Concepción-San Pedro los baños se define en este trabajo como una secuencia de depósitos fluvio-lacustres y paleosuelos intercalados con depósitos piroclásticos y que en una parte fueron alterados por hidrotermalismo (geiseritas de la unidad los Baños). La unidad se encuentra localizada entre las poblaciones de Concepción y San Pedro los Baños al norte del lago Los Baños (ver mapa geológico) y a una distancia de 15 km al norte de la población de Ixtlahuaca. En 2014 se hizo una investigación antropológica en San Pedro y la Concepción de los Baños en la cual se relató la presencia y la extinción de una zona recreativa con presencia de aguas termales (Cruz-Clemente, 2014) y que se encontraba en una capilla (Figura 4.8) con fuente de ingreso localidades.



Figura 4.8 - Iglesia en la cual emergía el agua termal, en la parte interna había unas piscinas las cuales eran fuente de ingresos para esta capilla.

La unidad Concepción-San Pedro los baños está compuesta por una secuencia de depósitos fluvio-lacustres y paleosuelos intercalados con depósitos piroclásticos y una unidad de geiseritas y depósitos hidrotermales ricos en sílice. Los depósitos fluvio-lacustres y paleosuelos con depósitos piroclásticos afloran a lo largo de los bordes del lago los baños y hacia la parte norte y noreste del lago en las cercanías de la Hacienda Villeje. Los depósitos fluvio-lacustres presentan arenas, limos y arcillas de color gris oscuro a blanco; las arenas presentan muchos fragmentos de cuarzo, de rocas volcánicas ácidas e intermedias, fragmentos de piedra pómez y magnetita en cristales. Las arenas presentan laminación cruzada y los contactos con paleosuelos son ondulados a rectos. Los limos y arcillas presentan color gris claro a blanco con desarrollo de pedogénesis demostrado por raíces.

Los depósitos piroclásticos comprenden depósitos de caída, oleadas piroclásticas y flujos de pómez y ceniza. Están compuestos de ceniza volcánica, fragmentos volcánicos tamaño lapilli que comprenden líticos volcánicos andesíticos y de rocas ácidas, así como piedra pómez. Los depósitos de oleada presentan una geometría ondulada y laminaciones cruzadas.

Las geiseritas de la unidad Concepción-San Pedro los Baños están constituidas de bandas horizontales de reemplazamiento hidrotermal. Las bandas están compuestas de sílice amorfo, calcedonia y arcillas de color blanco. El sílice amorfo y calcedonia presenta un color beige y blanco. El sílice amorfo se presenta en vetillas que cortan a capas horizontales. En algunas partes de la unidad se observan numerosas oquedades de disolución con presencia de estalagmitas de sílice amorfo, como se puede ver en la imagen en campo (Figura 4.9). Las geiseritas parecen haber reemplazado a la secuencia fluvio-lacustre con paleosuelos y depósitos piroclásticos ya que se observan texturas relictas de estos depósitos entre las capas de sílice amorfo hidrotermal y se observan frentes de reemplazamiento hidrotermal acompañadas de vetas y vetillas de sílice amorfo y arcillas blancas.

La edad de los depósitos fluvio-lacustres, paleosuelos y piroclásticos se infiere pueda ser del Plioceno-Cuaternario ya que en la región del Valle de Ixtlahuaca se han descrito depósitos fluvio-lacustres con diatomitas del Plioceno (Israde-Alcantara et al., 2010) y se han encontrado restos de mamuts en lahares Atlacomulco (Salinas-Sánchez, 2013). La unidad de geiseritas es más reciente ya que la actividad hidrotermal parece haber estado activa todavía en los años 40's (Cruz-Clemente, 2014) y puede ser que haya iniciado en el Holoceno ya que hay actividad del volcán Jocotitlán de menos de 10 000 años (Salinas-Sánchez, 2013).

El lago los Baños ubicado entre las poblaciones Concepción y San Pedro los Baños en este trabajo se interpreta pudiera haber sido una estructura volcánica antigua, como un maar, ya que las características volcánicas que se observan en la zona como depósitos piroclásticos con evidencias texturales freatomagmáticas como las oleadas piroclásticas (Figura 4.10).



Figura 4.9 - Geiseritas de la unidad Concepción-San Pedro los baños, en el afloramiento se pueden ver dos zoom; a) estalagmitas de origen hidrotermal y b) sílice de alteración termal.

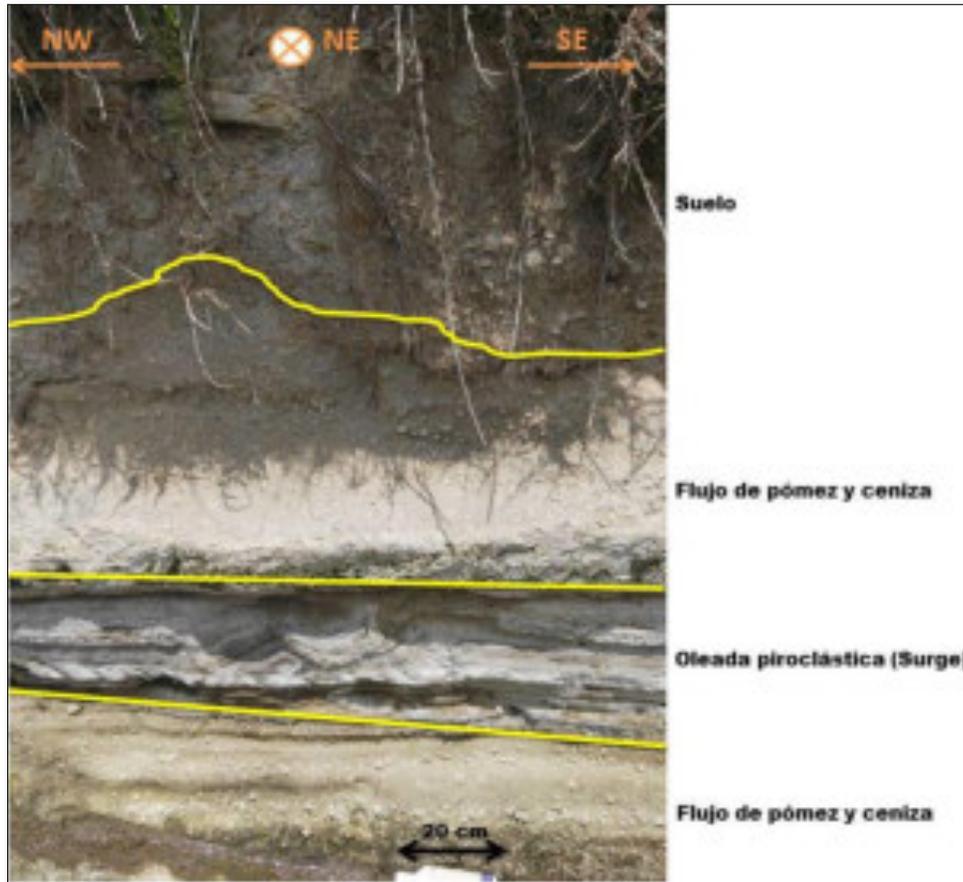


Figura 4.10.- Depósitos piroclásticos de la unidad Concepción-San Pedro los baños, a 30m al NE de la Iglesia de los baños.

4.4.3 Estructuras y depósitos volcánicos Plio-Cuaternarios

En este trabajo se agrupa como estructuras volcánicas y depósitos volcánicos Plio-Cuaternarios a varios volcanes y depósitos volcánicos asociados que se encuentran en el bloque del bajo y en el sector noroeste de la falla Perales. En este grupo se encuentran las siguientes unidades y volcanes: volcán Til, volcanes de Coajomulco-Tlalchichilpa, volcán Purísima Concepción Mayorazgo, volcán Los Arenales, volcán Jalpa, volcán San Antonio Mextepec, andesitas San Jerónimo Bonchete, volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca y volcán La Guadalupana. En la cartografía geológica compilada del INFOMEGEM (2009) estas estructuras volcánicas fueron consideradas compuestas de rocas volcánicas indiferenciadas de San Felipe del

Progreso y basaltos y andesitas de la sierra Mazahua cuya edad fue considerada del Plioceno. En la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1: 250 000 clave E14-2 estas estructuras son consideradas compuestas de andesitas del Cuaternario.

4.4.3.1 Volcán Til

El volcán Til se ubica entre San Miguel Tenoxtitlán y San Felipe del Progreso. Este volcán es considerado un domo volcánico compuesto de andesita basáltica, sus derrames de lava en su parte oriente presentan espesores gruesos. Las laderas más distales presentan depósitos piroclásticos con ceniza y lapilli de composición intermedia; sobreyaciendo estos depósitos aparecen depósitos epiclásticos de abanicos aluviales y desarrollo de suelo. La edad de este volcán es considerada Plio-Cuaternaria con base en los trabajos antecedentes, ya que Sanchez-Rubio (1984) considera a los volcanes en la cercanía de Atlacomulco como Andesita Atlacomulco de edad Plioceno-Pleistoceno y que Suter et al. (1995) reporta una edad de 0.4 ± 0.1 Ma para un cono de escoria y derrames de basalto denominado cerro Laxco ubicado a 2 km al norte de Atlacomulco.

4.4.3.2 Volcanes Coajomulco-Tlalchichilpa

Los volcanes Coajomulco-Tlalchichilpa están ubicados en el sector noroeste de la falla Perales y hacia el bloque del bajo; estas estructuras volcánicas comprenden a un complejo de domos volcánicos, volcanes de escoria basáltica y derrames lávicos de composición andesita y basalto (Figura 4.11). Las andesitas de los domos presentan una textura afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasas. Los conos piroclásticos están compuestos de intercalaciones de escoria basáltica con derrames basálticos; la escoria basáltica presenta en ocasiones oxidación termal con presencia de hematita e hidróxidos de hierro.

En algunas laderas aparecen depósitos de caída de composición intermedia que son sobreyacidos por depósitos de abanicos aluviales. La edad de este complejo de volcanes se infiere pueda ser Plio-Cuaternaria por las mismas relaciones descritas para el volcán Til.



Figura 4.11 - Andesitas del complejo volcánico Coajomulco-Tlalchichilpa.

4.4.3.3 Volcán Purísima Concepción Mayorazgo

El volcán Purísima Concepción Mayorazgo está ubicado entre las poblaciones de Purísima Concepción Mayorazgo y San Lucas Ocoatepec, que pertenecen al municipio de San Felipe del Progreso. De acuerdo con la carta geológica minera del SGM con clave E14-2 (Ciudad de México) este volcán está compuesto por dacita (perlítica) del cuaternario, sin embargo, en este trabajo se observaron en sus laderas derrames andesítico-basálticos. En Santa Cruz Mextepec se observaron derrames lávicos de andesita basáltica cubiertos por depósitos de cenizas de composición intermedia que pueden pertenecer a este volcán.

Este volcán es el extremo terminal de la falla Perales y los depósitos volcánicos de esta estructura volcánica no están afectados por la falla. Los derrames de este volcán hacia el sur en donde se localiza la presa Tepetitlán cubren a las ignimbritas de la caldera El Capulín que se han considerado en ca. 4 Ma (Corona-Chávez et al., 1991; Hernández-Bernal et al., 2016).

4.4.3.4 Volcán los Arenales

Este volcán se encuentra cerca de la localidad de Palmillas en el municipio de San Felipe del Progreso y a lo largo de la carretera libre de San Felipe del Progreso a Ixtlahuaca. El volcán se considera un domo volcánico alargado norte-sur y que está constituido por basalto. El basalto presenta una textura de afanítica a porfídica (Figura 4.12). Cuando es porfídica la matriz es de vidrio volcánico con fenocristales de olivino y plagioclasa. En la matriz del basalto se observó magnetita. Los derrames de lava presentan una estructura tabular con desarrollo de autobrechas. En algunos afloramientos se observaron fallas NW-SE que afectan a sus depósitos.



Figura 4.12 - Flujo de lava basáltico del Volcán los Arenales, en el acercamiento (zoom) se puede ver al basalto, los cristales que se ven blancos en la imagen son cristales de olivino grandes de color verde, los cuales tenían un tamaño aproximado de 2 a 4 mm.

4.4.3.5 Volcán Jalpa

El volcán Jalpa es una estructura volcánica ubicada en el bloque del bajo de la falla Perales hacia el valle de Ixtlahuaca y en las faldas de la parte norte se ubica la comunidad de San Juan Jalpa. Topográficamente es un alto positivo con dos cimas, el cerro Jalpa y el cerro Papalotepec. El volcán está compuesto de derrames basálticos intercalados con depósitos piroclásticos y autobrechas volcánicas. Los derrames basáltico-andesíticos en ocasiones son ricos en olivino y que se emplazan uno sobre otro. En un afloramiento cerca del poblado Colonia Plateros se pueden

apreciar un flujo piroclástico sobre yaciendo un derrame de lava basáltico (Figura 4.13). Las características en sus depósitos sugieren que el volcán puede ser un estratovolcán pero también un domo volcánico.

La edad de este volcán se considera Plio-Cuaternaria porque pertenece al campo volcánico de Atlacomulco y las mismas consideraciones que los volcanes anteriores como el complejo volcánico Coajomulco-Tlalchichilpa. El volcán esta afectado por fracturas NW-SE al igual que el volcán Los Arenales.

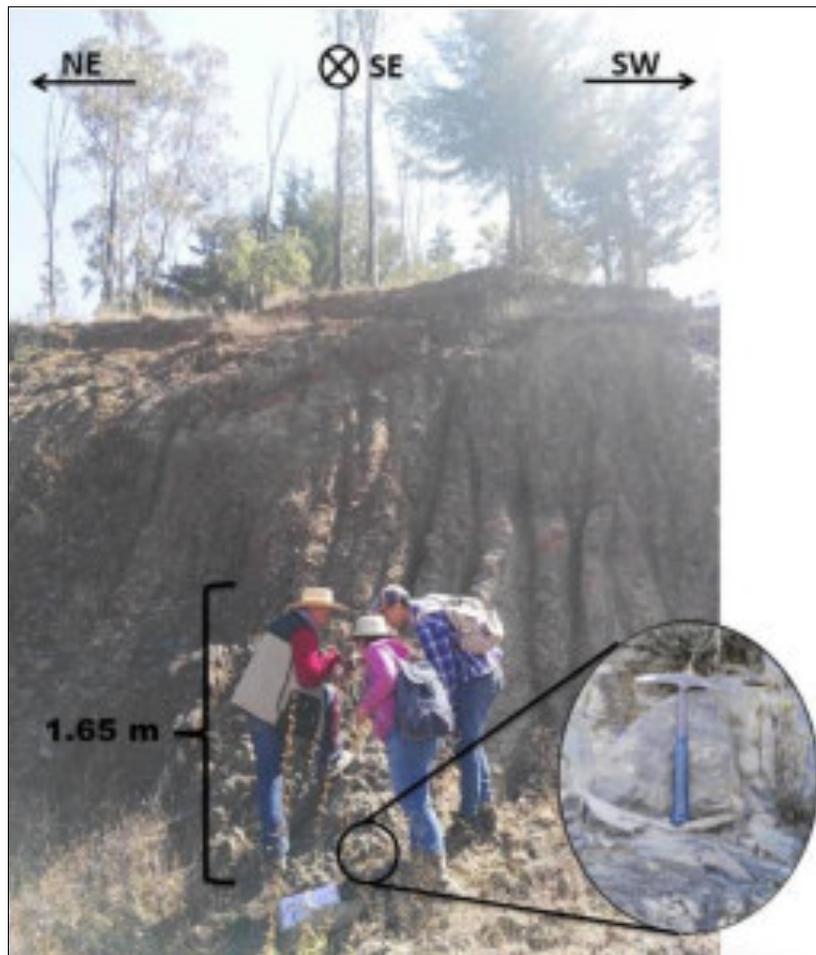


Figura 4.13 - Flujo piroclástico del Volcán Jalpa, el cual sobreyace un derrame de lava basáltica de la misma estructura, en el acercamiento se aprecia el derrame.

4.4.3.6 Volcán San Antonio Mextepec

El Volcán San Antonio Mextepec es una pequeña estructura volcánica de origen monogenético y piroclástico, se localiza en la cercanía de la población de San Antonio Mextepec y al poniente de la población Emilio Portes Gil (ver mapa geológico en anexos); con respecto a la falla Perales, se ubica a lo largo de su traza de falla. Los depósitos volcánicos observados en campo comprenden depósitos piroclásticos con fragmentos de escoria volcánica, flujos de brechas volcánicas de composición basáltica y escasos derrames de basalto. Los depósitos muestran oxidación termal y abundante hematita lo que le confiere una coloración rojiza y que sugiere que este magma tuvo alta cantidad de volátiles como oxígeno (Figura 4.14), este material es denominado tezontle. Este volcán actualmente sirve como un banco de extracción de dicha roca en San Antonio Mextepec, en la misma localidad.

Los depósitos piroclásticos de este volcán cubren a la falla Perales. La edad de esta estructura volcánica se infiere pueda ser del Cuaternario y equivalente a los conos piroclásticos de la parte norte de Acambay.

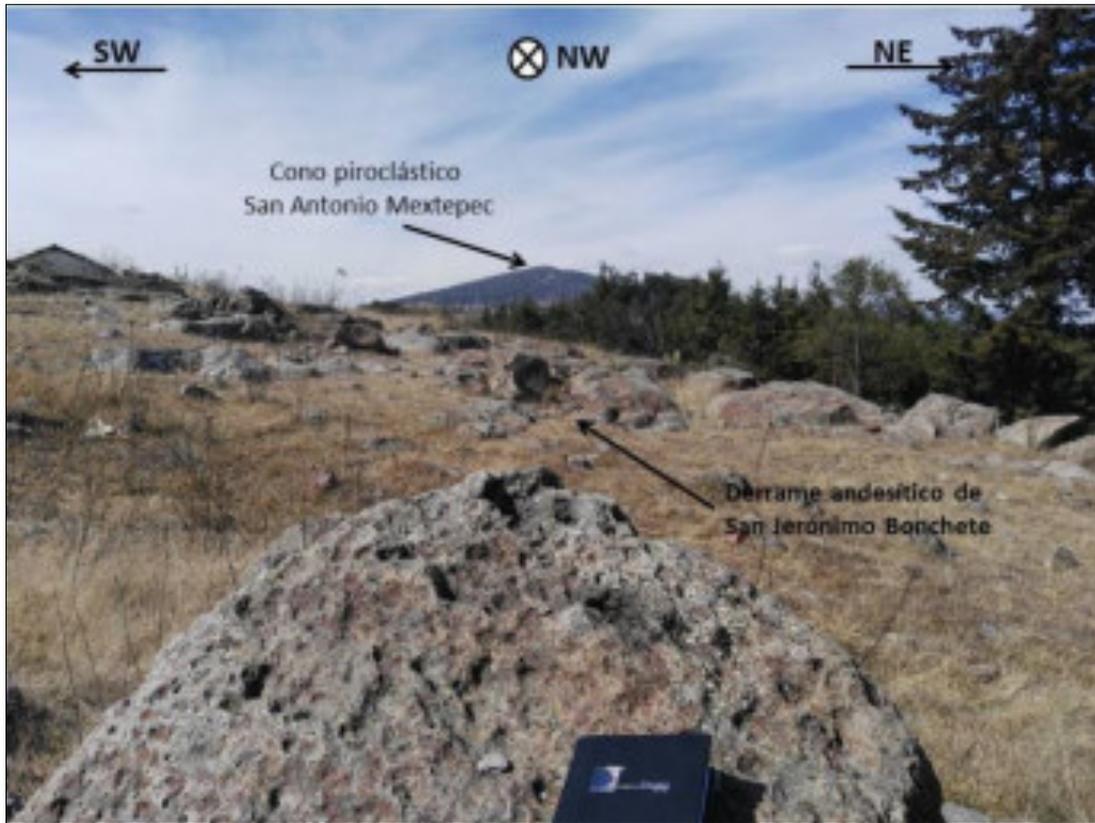


Figura 4.14 - En esta imagen se puede observar al fondo el cono piroclástico, mientras que al frente se ven andesitas de San Jerónimo.

4.4.3.7 Andesitas San Jerónimo Bonchete

Las andesitas San Jerónimo Bonchete afloran en el camino que va de Santa Cruz Mextepec a Santa Ana Nichi y están ubicadas en la población de San Jerónimo Bonchete. Estas andesitas se encuentran en la parte poniente del escarpe de la falla Perales y en el bloque del bajo de la falla. Las andesitas San Jerónimo Bonchete comprenden derrames de andesita con estructura tabular y laminar. Las andesitas presentan una textura afanítica con matriz vítrea. Las andesitas están poco fracturadas y se observa poco desarrollo de suelo (Figura 4.15). Estas andesitas provienen de dos centros de emisión que corresponden con dos cimas topográficas como son el Cerro de San Jerónimo Mavatí y otra cima ubicada a 3 km

al sureste de la población de San Jerónimo Bonchete y los volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca.

La edad de estas andesitas se infiere pueda ser Plio-Cuaternaria pero más antigua que el volcán San Antonio Mextepec ya que estas andesitas están cortadas por la falla Perales mientras que los depósitos del volcán San Antonio no están afectados por la falla. Las andesitas San Jerónimo Bonchete sobreyacen a andesitas y Basaltos Santa Ana (ver mapa geológico).



Figura 4.15 - Derrame andesítico de San Jerónimo Bonchete.

Volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca

Los volcanes de San Ana Ixtlahuaca están ubicados entre la carretera libre que sube hacia Santa Ana Nichi por el escarpe de la falla Perales y la población de Santa Ana Ixtlahuaca. Los volcanes comprenden un complejo de centros de emisión que son evidenciados por rasgos topográficos y fotointerpretación geológica; los centros de emisión comprenden a el Cerro El Tigre y varias cimas adyacentes a este cerro y no más de 3 km de distancia hacia el oriente, entre San Nicolás Mavatí y la comunidad de Barrio de Shira al borde del escarpe de la falla Perales.

Las rocas que comprenden este complejo son andesitas y basaltos y flujos de autobrechas andesíticas. Los derrames lávicos presentan espesores gruesos de por lo menos 10 m y con diaclasas de enfriamiento formadas paralelas al emplazamiento horizontal y en ocasiones se observa una estructura columnar

En este grupo de volcanes es incluido un volcán piroclástico basáltico en el que se asienta parte de la población de Santa Ana Ixtlahuaca. Este volcán presenta depósitos de flujos de brechas andesítico-basálticas y depósitos piroclásticos de caída con fragmentos vesiculados de andesita-basalto (figura de volcán san Antonio).

Estos volcanes están afectados por la falla Perales ya que se observa que algunos centros de emisión en el oriente del Cerro El Tigre fueron disectados por fallas; esta disección de partes elevadas de antiguos centros de emisión le confiere una expresión muy inclinada al relieve y cañadas muy abruptas en la zona de Santa Ana Ixtlahuaca. La edad de estos volcanes se infiere Plio-Cuaternaria ya que están sobre las andesitas de Santa Ana y son anteriores al volcán de San Antonio Mextepec.

4.4.3.8 Volcán La Guadalupana

El Volcán La Guadalupana se ubica en el extremo sureste de la falla Perales y en la intersección del escarpe con la falla Ixtlahuaca. Se ubican dos poblaciones en

este volcán que son San Miguel El Alto y La Guadalupana. Esta estructura volcánica es la de mayor prominencia topográfica a lo largo del escarpe de la falla Perales con 3300 msnm aproximadamente.

Las rocas volcánicas de este volcán comprenden derrames de basalto y andesitas con estructura laminar y tabular. El espesor de los derrames varia de unos cuantos metros a por lo menos 30 m de espesor. Los derrames lávicos presentan diaclasamiento horizontal paralelo con el flujo (Figura 4.16). Las rocas andesíticas-basálticas presentan una textura afanítica con pequeños cristales de plagioclasa orientados con el flujo. En ocasiones se presentan texturas vesiculadas y alargadas con las líneas de flujo en los derrames. Estas andesitas basálticas cubren en ocasiones depósitos piroclásticos de la misma composición y a veces flujo de brechas volcánicas. En este trabajo se considera con base en la naturaleza de sus productos volcánicos un estratovolcán.

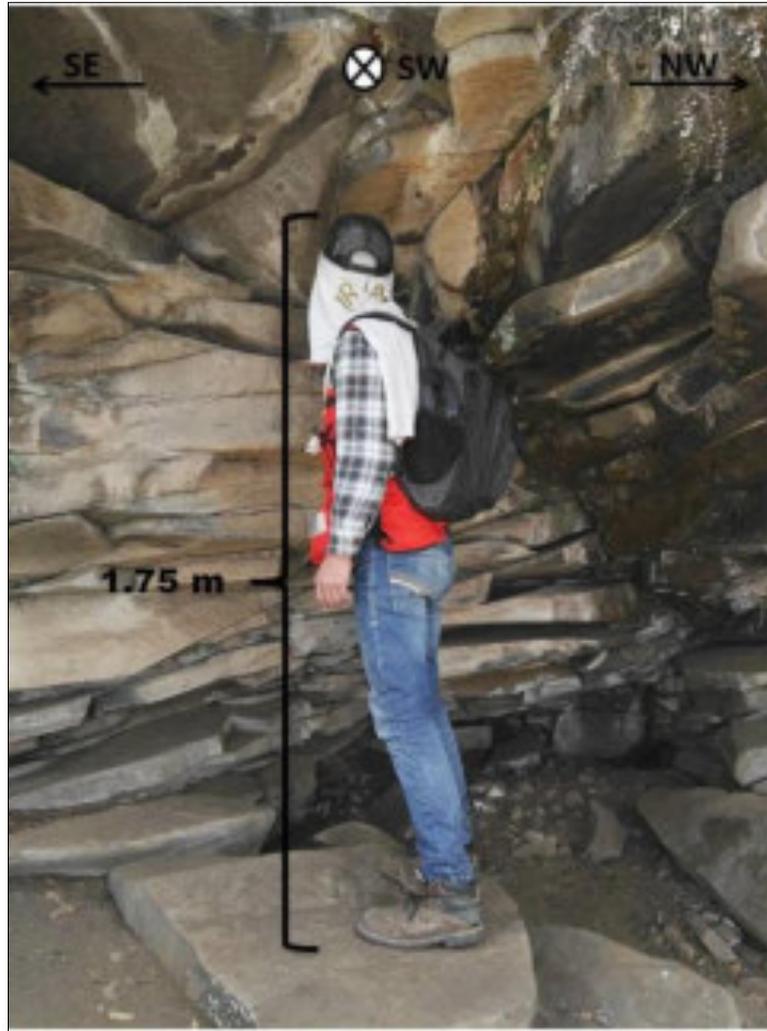


Figura 4.16 - Flujos andesítico-basálticos de la Guadalupeana, se pueden apreciar las lajas de basalto.

Los derrames volcánicos de este volcán están cortados por la falla Perales en su parte oriente. A lo largo del escarpe de la falla se puede observar que estos derrames lávicos son cubiertos por depósitos de coluvión y talud y algunos derrumbes (Figura 4.17). La edad que se considera para el volcán La Guadalupeana es Plio-Cuaternario y puede que su edad mínima sea de menos de ca. 3 Ma ya que también parte de sus derrames de andesita basáltica son cortados por la falla Ixtlahuaca y en la Sierra de Las Cruces se han fechado rocas andesíticas de 3.71 ± 0.4 Ma (Osete et al., 2000) que son cortadas por la falla Ixtlahuaca (García-Palomo et al., 2008).



Figura 4.17 - Depósitos de talud del Volcán de la Guadalupe, en la imagen se pueden apreciar rocas de diferentes tamaños, rocas fracturadas y bloques de gran tamaño.

4.4.4 Depósitos epiclásticos y volcanosedimentarios en el escarpe de la falla Perales y en el Valle de Ixtlahuaca

4.4.4.1 Depósitos piroclásticos Mextepec

Los depósitos piroclásticos Mextepec se encuentran a lo largo de todo el escarpe de la falla Perales, desde San Juan Las Manzanas hasta las cercanías con San Antonio Mextepec (Figura 4.18-A).

En estos depósitos piroclásticos se presentan depósitos de pómez y ceniza, pómez y bloques de andesita-basalto y depósitos de ceniza volcánica. Estos depósitos en ocasiones se observaron cubriendo a paleosuelos.

Los depósitos de pómez y ceniza presentan un color pardo claro a pardo amarillento con abundante pómez y contacto grano a grano y en ocasiones están intercalados con cenizas volcánicas (Figuras 4.18-B y 4.18-C); estos depósitos son de composiciones andesíticas.

Los depósitos piroclásticos con pómez y bloques de andesita-basalto presentan estratificación masiva con abundantes bloques angulosos de roca volcánica en una matriz de líticos volcánicos de menor tamaño en tamaño lapilli. Los bloques de andesita-basalto muestran estructuras de rompecabezas que indican un emplazamiento de alta temperatura (Figura 4.28-D), y posiblemente cercanos a la fuente de emisión volcánica.

Los depósitos de ceniza volcánica presentan colores pardos oscuros a pardos rojizos y pardos amarillentos. Estos depósitos están compuestos de ceniza volcánica andesítica y se observaron algunos líticos volcánicos de andesita dispersos en la matriz, así como fragmentos de troncos carbonizados (Figura 4.18-E). Los depósitos mantienen laderas y rellenan antiguos valles cubriendo paleosuelos.

La edad de estos depósitos piroclásticos Mextepec se considera pueden ser Plio-Cuaternarios ya que pueden ser depósitos de los volcanes del borde de la falla Perales como el estratovolcán La Guadalupana, el complejo de volcanes de Santa Ana, los volcanes que originaron a las andesitas de San Jerónimo Bonchete, y otros volcanes piroclásticos andesítico-basálticos de menor tamaño ubicados en el escarpe de la falla que no se diferenciaron en este trabajo.

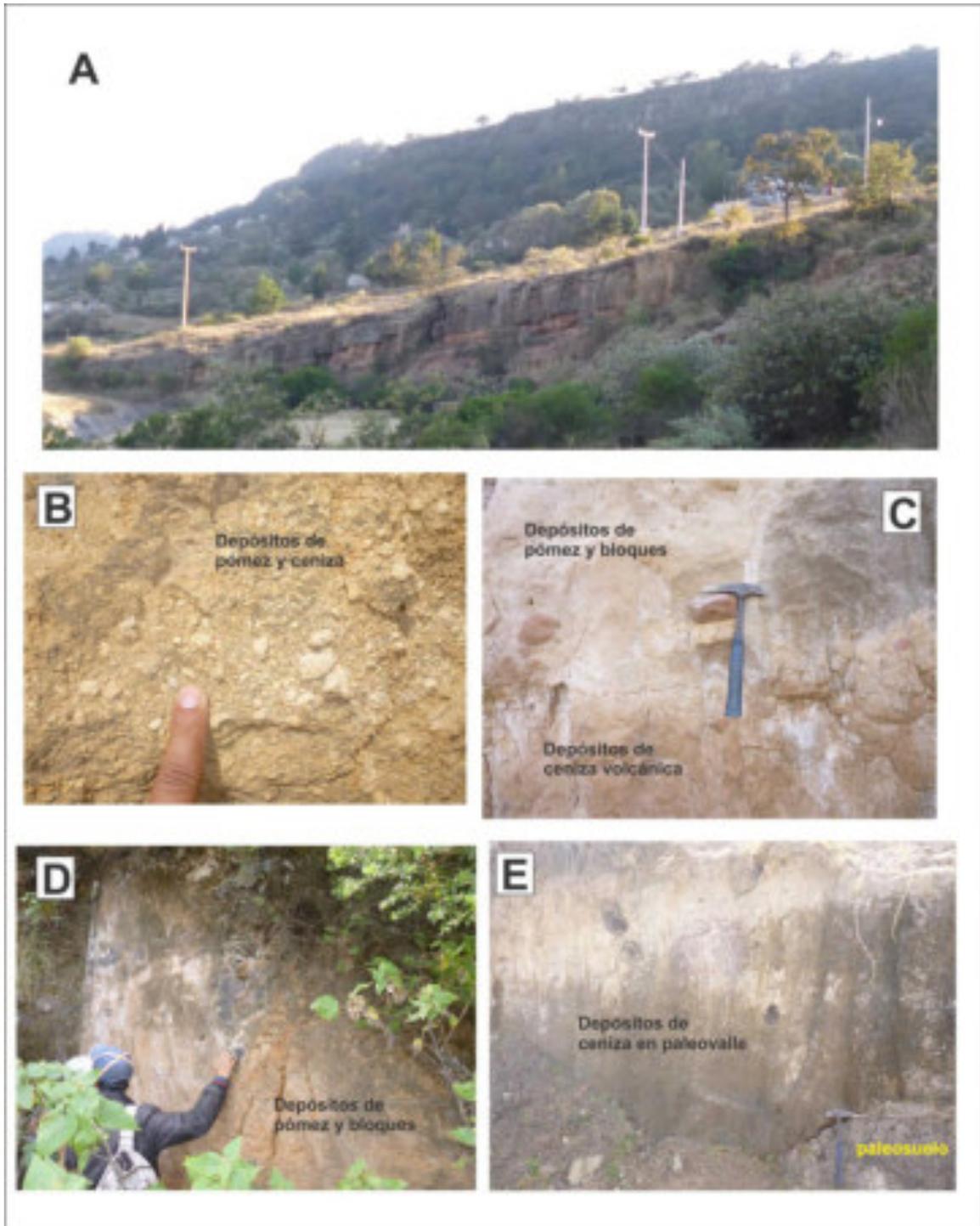


Figura 4.18 - Depósitos piroclásticos de caída del escarpe de la falla Perales. A, Depósitos piroclásticos en Santa Cruz Mextepec; se observa estratificación entre estos y paleosuelos. B, Depósitos de pómez y ceniza en San Juan Las Manzanillas. C, Depósitos de pómez y ceniza con algunos bloques de andesita que sobreyacen a depósitos de ceniza volcánica de composición andesítica. D, Depósitos piroclásticos de andesita-basalto con bloques con estructura de

rompecabezas. E, Depósitos de ceniza de caída que rellenaron un paleovalle sepultando un paleosuelo.

4.4.4.2 Depósitos de Coluvión y Talud

Depósitos de coluvión y deslizamientos

Los deslizamientos y depósitos de coluvión están ubicados al frente del escarpe de la falla Perales (ver mapa geológico en anexos). Se identificaron abundantes deslizamientos y depósitos de coluvión entre San Juan Las Manzanas y Santa Ana Ixtlahuaca; en este sector los deslizamientos y depósitos de coluvión están localizados al pie de varios bloques escalonados limitados por escarpes de falla. Existe un deslizamiento mayor en San Ana Ixtlahuaca al cual se le denominó deslizamiento San Isidro porque al pie de este depósito se encuentra la población de San Isidro Boxipe.

Los depósitos de deslizamientos y coluvión están compuestos de bloques y clastos de roca basáltica, andesítica y en ocasiones filitas. La matriz de estos depósitos es arena gruesa y bloques de menor tamaño de las mismas litologías que los bloques mayores. Estos depósitos presentan una mala clasificación y clastos subangulosos a angulosos (Figuras 4.19 y 4.20). En algunos depósitos de deslizamientos se encontraron puntas de lanza de obsidiana y cerámica prehispánica.

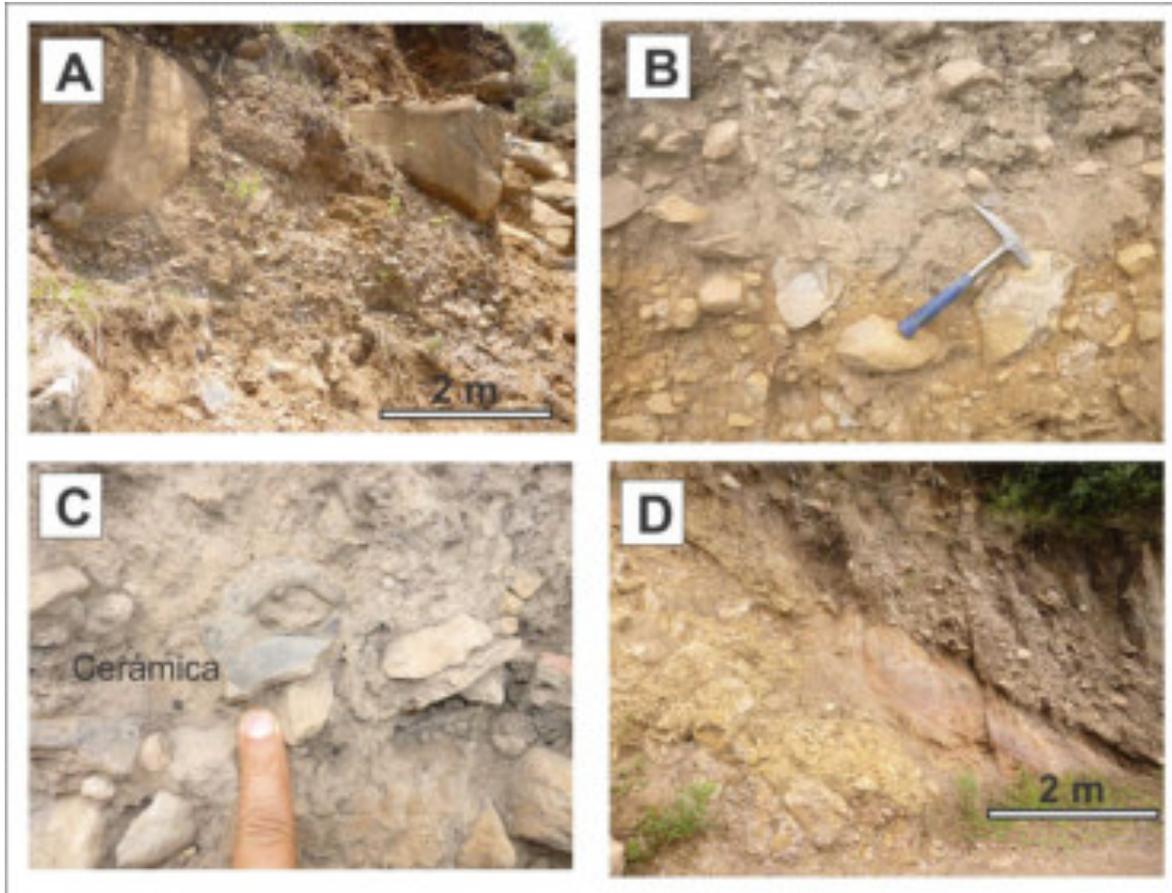


Figura 4.19 - Depósitos de deslizamiento y coluviones en el escarpe de la falla Perales. A, bloques angulosos de andesita de escala métrica rodeados de matriz arenosa y otros bloques de menor tamaño. B, Deslizamiento con bloques angulosos y con mayor cantidad de matriz de arena. C, Depósito de deslizamiento con bloques de andesita, basalto, restos de cerámica prehispánica en una matriz arenosa limosa. D, Deslizamiento que sobreyace a filitas pelíticas de la Formación Xochitepec en la subida a Santa Ana Nichi.



Figura 2.10 - En la figura se puede apreciar el deslizamiento, el “escarpe” y la cabecera del mismo, el cual tenía bloques de andesita con ceniza y pómez, además es rico en arcilla, ubicado cerca de la comunidad de San Andrés del Pedregal.

La edad de los deslizamientos y coluviones asociados se infiere del Cuaternario ya que estos deslizamientos cubren en ocasiones a los depósitos piroclásticos del escarpe de la falla Perales. En algunas localidades se observaron antiguos deslizamientos que son cubiertos por depósitos piroclásticos de caída y estas relaciones sugieren que en el pasado ha habido actividad de la Falla Perales. En la figura 4.21 se muestra un deslizamiento sobre un flujo de pómez y ceniza, ubicado

topográficamente más abajo que el de la figura anterior, lo que apoya la hipótesis de superposición de flujos piroclásticos y deslizamientos.

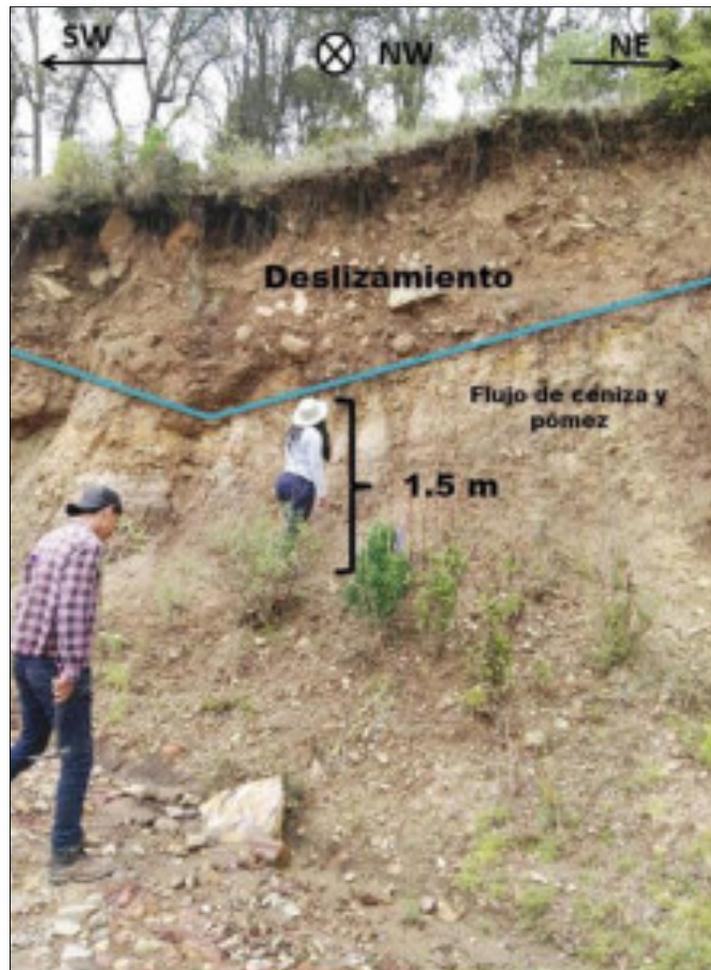


Figura 4.21 - Deslizamiento sobre un flujo piroclásticos de pómez y ceniza.

El deslizamiento de San Isidro se localiza entre Santa Ana Ixtlahuaca y San Isidro Boxipe. Este deslizamiento se identificó por la interpretación fotogeológica y el análisis topográfico; ya que muestra una expresión geomórfica prominente de un arco de erosión al pie del escarpe de la falla perales con forma de herradura abriendo hacia el valle de Ixtlahuaca (Figura 4.22).



Figura 4.22 - Deslizamiento San Isidro ubicado en el escarpe de la falla Perales

Depósitos de talud de fallas

Los depósitos de talud en fallas se localizan en varias partes a lo largo del rumbo de la falla Perales desde San Juan las Manzanas hasta San Antonio Mextepec. Los depósitos de talud presentan bloques de rocas andesíticas, basálticas, depósitos piroclásticos de composición andesítica-basáltica y a veces bloques de antiguos deslizamientos. Los depósitos presentan mala clasificación y presentan formas subangulares a angulares. Al alejarse de las fallas los depósitos se convierten en depósitos de facies de abanicos aluviales con granulometrías más finas.

Los depósitos de talud de falla sobreyacen a brechas de falla y son sobreyacidos por depósitos de coluvión o abanicos aluviales más jóvenes para finalmente suelos (Figura 4.23). Entre la zona de San Juan las Manzanas y Santa Ana Ixtlahuaca aparecen estos depósitos al pie de bloques escalonados que evidencian fallas

normales escalonadas que se describirán más adelante en el capítulo de geología estructural.

La edad de estos depósitos se interpreta es Plio-Cuaternaria, pero parecen ser más jóvenes que los volcanes de San Ana ya que se observó que las fallas cortan a volcanes piroclásticos compuestos de escoria andesítico-basáltica y los depósitos están enseguida de las brechas de falla. En base a estas relaciones se interpreta que los depósitos de talud de falla no son más antiguos que ca. 3 Ma y puede haber depósitos de talud en fallas de épocas prehispánicas.

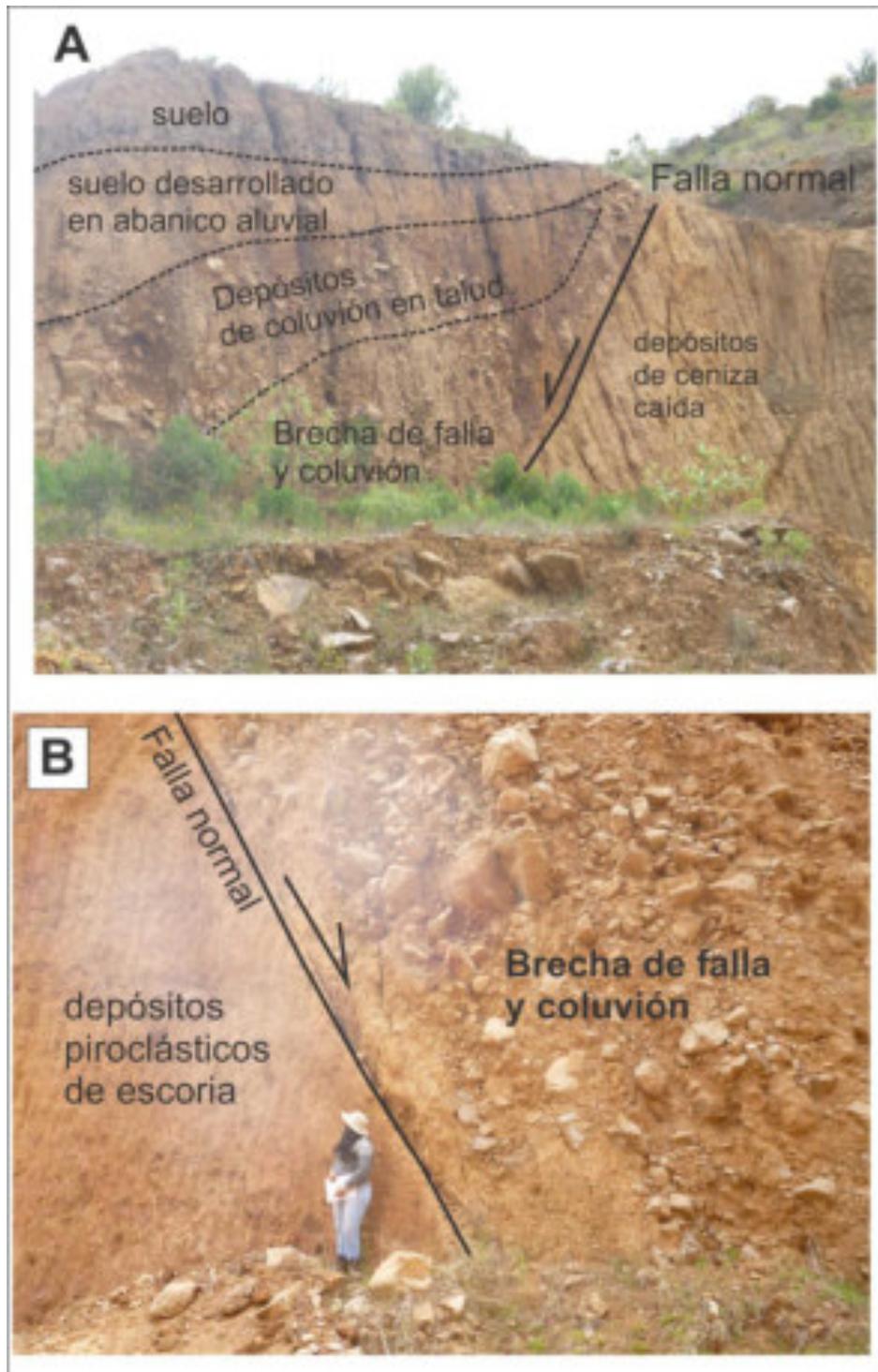


Figura 4.23 - Depósitos de talud de falla asociados a fallas normales en el escarpe de la falla Perales. A, Falla normal que corta a depósitos de caída andesíticos y que ha desarrollado brecha de falla seguida de una secuencia de depósitos de talud de falla, luego coluviones y abanicos aluviales. B, Falla que corta a un volcán piroclástico con brecha de falla sobreyacida por depósitos de talud de falla.

4.4.4.3 Abanicos aluviales

Los depósitos de abanicos aluviales se presentan a lo largo de todo el escarpe de la falla Perales (ver mapa geológico en anexos). Los depósitos de abanicos aluviales presentan varias facies sedimentarias dependiendo de su distancia hacia los escarpes que se presentan en las laderas mirando hacia el valle de Ixtlahuaca. En la figura 2.24 se muestran las distintas facies sedimentarias de estos depósitos que van de depósitos con abundantes bloques angulosos a subangulosos y hasta depósitos distales con desarrollo de conglomerados y depósitos limos y arcillas en las cercanías del valle.

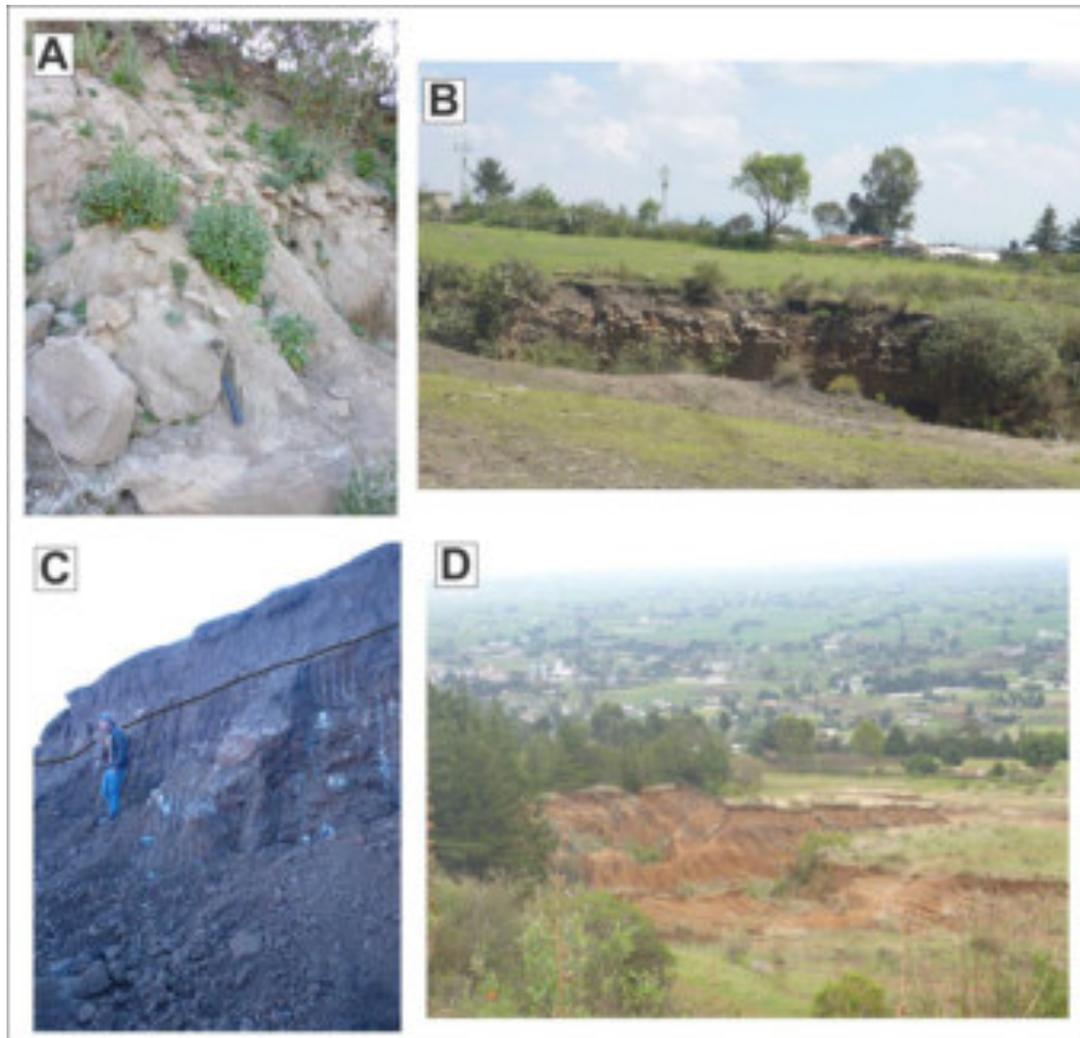


Figura 4.24 - Distintas facies sedimentarias de abanicos aluviales en el escarpe de la falla Perales. A, estratificación de limos y arenas con capas de gravas; existen bloques grandes de 50 cm. Los

bloques son angulosos a subangulosos indican proximidad a laderas empinadas. B, facies distales de conglomerados y gravas con clastos bien redondeados con matriz de arena gruesa. C, facies intermedias en donde se observan limos arenosos y limos arcillosos con bloques de andesita flotando en la matriz. D, facies muy distales, cerca de la planicie del Valle de Ixtlahuaca compuestos de paleosuelos y sedimentos arcillosos y limosos.

En San Juan las Manzanas en el municipio de Ixtlahuaca los depósitos de abanicos aluviales cubren una gran superficie, están constituidos por material volcánico retrabajado y que fue transportado ladera abajo por gravedad. Estos depósitos están disectados por cañadas que son resultado de erosión hídrica principalmente. Los abanicos aluviales se encuentran sobreyaciendo a derrames andesítico-basálticos y algunos deslizamientos antiguos (Figura 4.25).



Figura 4.25 - Abanico aluvial al sur de San Miguel de las Manzanas, con presencia de cárcavas por erosión hídrica y al se observa el Volcán la Venta.

La edad de los depósitos de abanicos aluviales es del Cuaternario ya que cubren a depósitos de deslizamientos y depósitos de talud de fallas, así como a la unidad de rocas piroclásticas del escarpe de la falla Perales.

4.4.4.4 Depósitos volcánicos y sedimentarios del Valle de Ixtlahuaca

Fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca

En la región de San Francisco a 4 km al norte de la población de Ixtlahuaca Israde-Alcántara et al. (2010) Describieron una columna estratigráfica en la que encuentran de lo más antiguo a lo más reciente depósitos de pómez blanca, seguido de arenas, limos arcillas y pómez, seguido de capas de limos, arenas, gravas con pliegues y fallas sinsedimentarias, después capas de diatomitas y limos y finalmente flujos de detritos volcánicos; adicionalmente describen que existen paleosuelos intercalados y depósitos de ceniza volcánica. Israde-Alcántara et al. (2010) con base en las diatomeas de las capas asigna una edad de Plioceno-Pleistoceno a estas capas.

En parte estos depósitos fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca se considera que fueron se formaron en el Holoceno y que se encuentran en la parte superior de la cuenca Ixtlahuaca (Sánchez-Rubio, 1984; Salinas-Sánchez, 2013) (Figura 4.26) y que corresponden con edades que van, de 28,180 a 1880 años aproximadamente (Sánchez-Rubio, 1984). En este trabajo se considera que los depósitos de Ixtapantongo definidos por Sánchez-Rubio (1984) son diferentes a los depósitos descritos por Israde-Alcántara et al. (2010) y las diferencias están en la posición estratigráfica y en la ubicación espacial. La edad de los depósitos fluvio-lacustres en el valle de Ixtlahuaca es la propuesta por Israde-Alcántara et al. (2010) y se considera Plioceno-Pleistoceno (4.27 de columna estratigráfica). En el trabajo de otra tesis de Colin-Rubio G. E, en proceso, se trata a la formación Ixtapantongo y que se ubicaría al sur de la falla Ixtlahuaca.



Figura 4.26 - Valle de Ixtlahuaca y al fondo el Volcan Jocotitlan

Depósitos Volcánicos dentro del Valle de Ixtlahuaca

En el Valle de Ixtlahuaca se encuentra una estratigrafía variada (Figura 4.27). El basamento está compuesto de la ignimbrita San Miguel Yuxtepec y de andesitas del Mioceno-Plioceno con sus depósitos piroclásticos asociados y que fueron descritas anteriormente como Andesitas Santa Ana. En la parte más profunda se debe encontrar el basamento metamórfico del Cretácico ya que aflora en el escarpe de la falla Perales y que también fue descrito anteriormente. En la cuenca del Valle de Ixtlahuaca también están rocas de vulcanismo ácido como la ignimbrita de la Caldera El Capulín y flujos piroclásticos de la Sierra de Las Cruces (Salinas-Sánchez, 2013).

En la parte poniente del Valle debe haber derrames de lava andesita-basalto de los volcanes que se encuentran en el borde y el bloque del bajo de la falla Perales, como por ejemplo Volcán La Guadalupana y volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca (Figura 4.27). Encima de estas unidades aparecen los depósitos fluvio-lacustres que describió Israde-Alcántara et al. (2010) en la población de San Francisco en las

cercanías de la población de Ixtlahuaca que comprenden depósitos de pómez, limos, arenas, arcillas, paleosuelos y diatomitas. A los ca. 600 000 años son reconocidos depósitos piroclásticos del volcán Jocotitlán (Salinas-Sánchez, 2013). La unidad que sobreyace a estos depósitos son la unidad Concepción-San Pedro de los Baños que fue descrita anteriormente (Figura 4.27) a esta unidad le sobreyacen depósitos volcánicos del volcán Jocotitlán que tienen una amplia distribución hacia el norte, noroeste y poniente del estratovolcán. Algunos de estos depósitos de oleadas piroclásticas se observaron en las faldas de los volcanes andesítico-basálticos de San Felipe del Progreso como Coajomulco y Tlalchichilpa, y también en los alrededores de la población de Emilio Portes Gil. Los últimos depósitos corresponden al sistema fluvial del río Lerma.

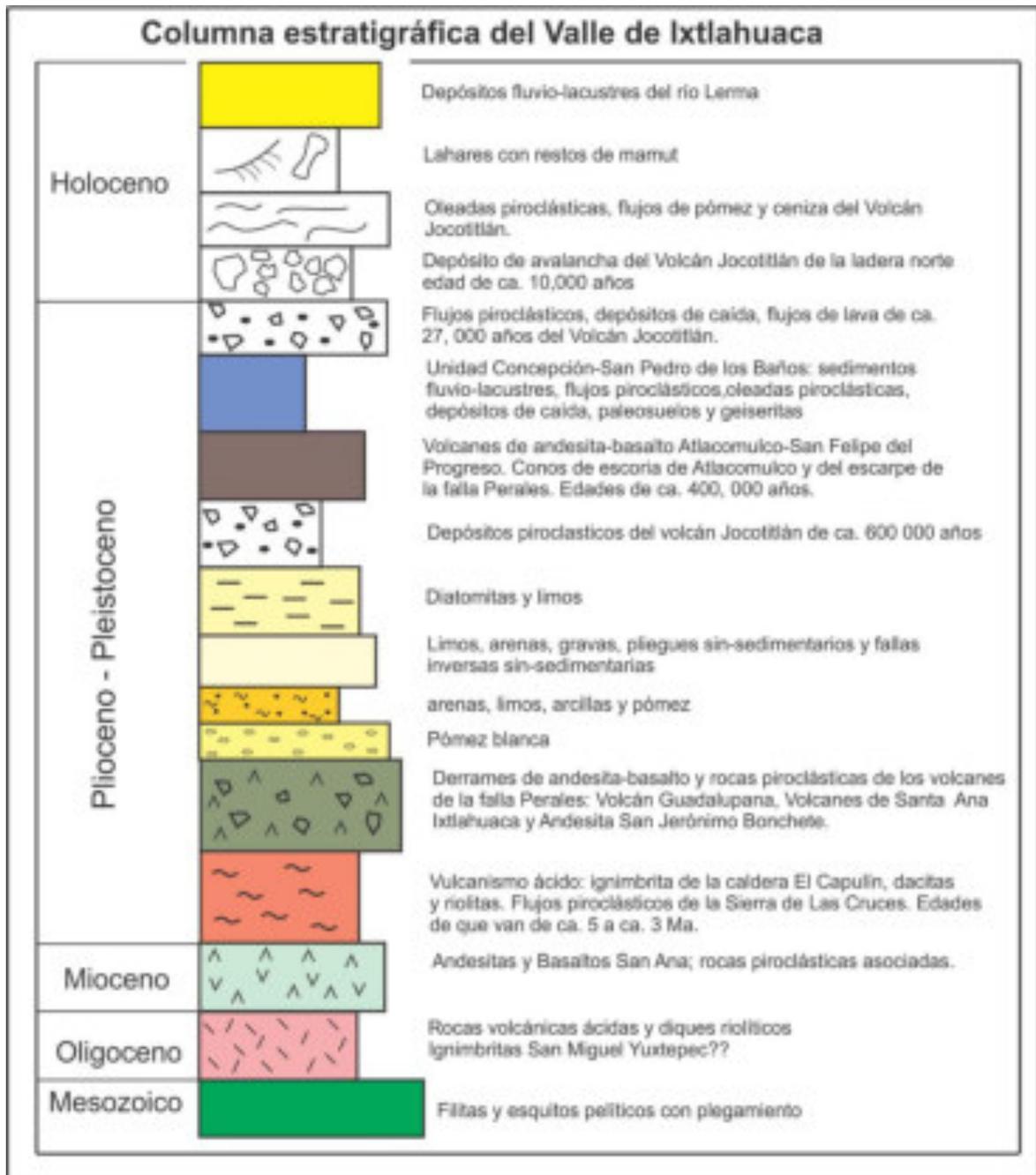


Figura 4.27 - Columna estratigráfica del Valle de Ixtlahuaca elaborada a partir de resultados de este trabajo de tesis y la compilación de datos geológicos de los trabajos: Sánchez-Rubio, 1984; Israde-Alcántara et al., 2010; Salinas-Sánchez, 2013.

4.4.4.5 Depósitos fluviales del Río Lerma

Los depósitos fluviales y algunos lacustres del Río Lerma están ubicados a lo largo de su curso y adyacentemente a este. El patrón del río Lerma sigue una configuración de meandros y vueltas amplias; las vueltas son amplias para esquivar los volcanes andesítico-basálticos de San Felipe del Progreso y Atlacomulco, y rodean también al lago los Baños en Concepción Los Baños. Algunos meandros son controlados por lineamientos estructurales NW-SE (ver mapa geológico en anexos) y la cercanía de meandros y su separación sugiere cambios de litología. En la cartografía estatal de INFOMEGEM (2009) los fueron considerados como aluvión.

En campo se observaron depósitos de limos, arenas y gravas, en donde se podían observar, aunque no es fácil porque se cubren con el agua en su curso o vegetación hacia sus bordes. El cauce erosiona parte de la columna estratigráfica del Plioceno-Cuaternario mostrada en la figura 4.27 (columna estratigráfica del valle de Ixtlahuaca).

La edad considerada a estos depósitos fluviales es del Holoceno. Estos depósitos son la unidad más joven dentro del área de estudio, ya que en la actualidad dichos depósitos están en formación y el agente formador sigue activo. Los depósitos son ricos mineralmente para el aprovechamiento agrícola a lo largo de sus barras de arena y planicies de inundación (Figura 4.28).

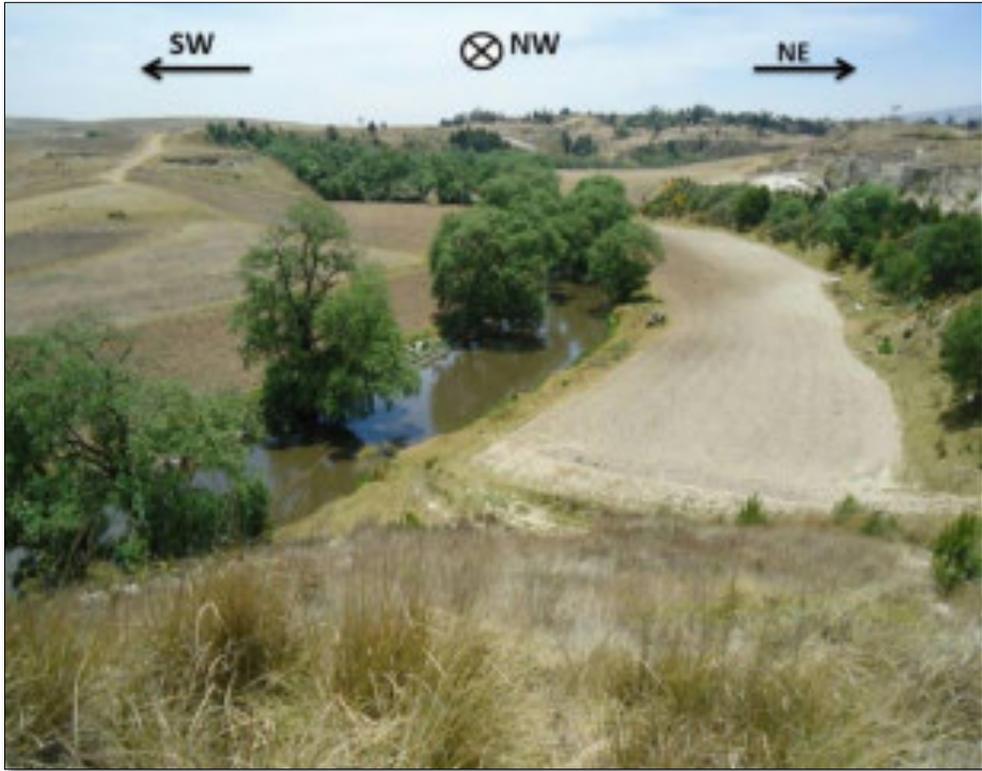


Figura 4.28 - Rio Lerma y sus llanuras de inundación aprovechadas para la agricultura.

5.1.1 Sistema de fallas Perales (falla Perales)

5.1.1.1 Sistema de fallas Perales (NW-SE)

El sistema de falla Perales (SFP) se ubica entre las poblaciones San Felipe del Progreso e Ixtlahuaca y en específico en el borde oriental de la sierra Mazahua. Este sistema de falla limita a la cuenca del Valle de Ixtlahuaca en su parte poniente y es el lugar en donde inicia la sierra Mazahua (ver figura de mapa geológico-estructural en anexos). Este sistema de fallas en trabajos antecedentes se maneja como falla Perales en donde se hicieron descripciones morfoestructurales (Ortiz y Bocco, 1984) y fue descrita por Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego (1990) como una estructura de de 50 km de longitud que incluía a la falla Ixtlahuaca con una orientación N45°W y E-W, con escarpes de 300 m de desnivel topográfico.

En este trabajo se diferencia la falla Perales de la falla Ixtlahuaca porque son dos estructuras muy diferentes en orientación y sus relaciones de corte, y se considera a la falla Perales como un sistema de fallas, ya que en la zona de daño se identificaron varias fallas subparalelas y otras fallas menores asociadas.

El sistema de fallas Perales (SFP) tiene una longitud de 22 km aproximadamente y un ancho que varia de de 6 km a 1 km siendo el ancho mayormente en la parte sur (San Juan las Manzanas) y el menor ancho hacia la parte norte (San Antonio Mextepec); este ancho podría ser mayor ya que las fallas pueden continuar por debajo de sedimentos del valle de Ixtlahuaca después del pie del escarpe.

El SFP tiene una una orientacion promedio preferencial de N45°W-S45°E, pero las fallas al interior del sistema varian de N70°W a N35°W con echados de 80° a 60° al NE (Figura 5.2). Las fallas NW-SE que están al interior de la zona de daño del SFP tienen longitudes de traza de falla que varían de 5 km a 0.5 km, hay fallas de longitudes de 2 km y 1 km (ver mapa estructural en anexos). Existen fallas antitéticas que están ocultas en el valle de Ixtlahuaca ya que se observaron bloques estratificados de la unidad de andesitas-basaltos Santa Ana y depósitos volcánicos

de los volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca que están basculados con inclinaciones hacia el valle (Figura 5.3).

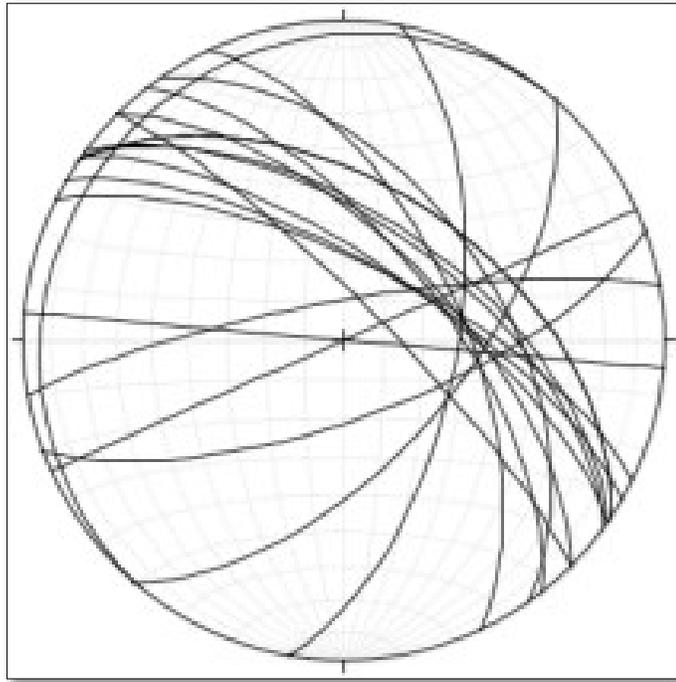


Figura 5.2 - Red estereográfica elaborada con software Stereonet, en la cual se muestra el sistema de fallas Perales NW-SE y el sistema NE-SW.

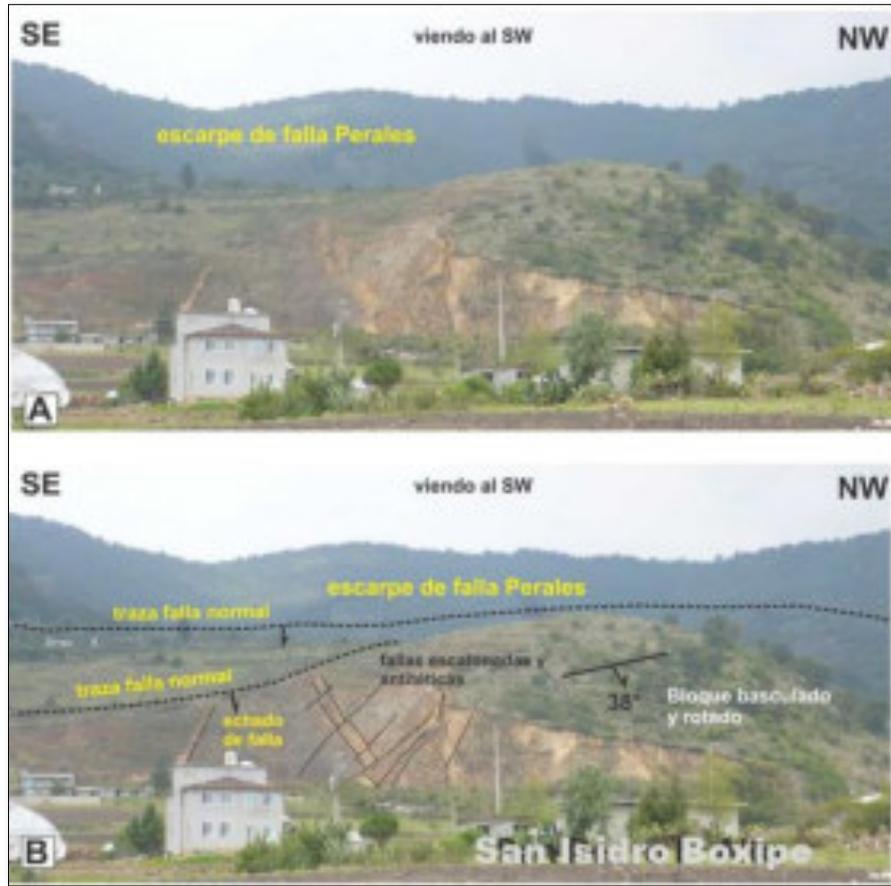


Figura 5.3 Sistema de fallas Peralas en San Isidro Boxipe. **A:** Escarpa de falla Peralas con bloque rotado de rocas volcánicas de la unidad andesita-basalto de Santa Ana y depósitos piroclásticos Peralas. **B:** Fracturas y fallas escalonadas y antitéticas en el bloque con rombo NW-SE y echado al NE.

El sistema de falla Peralas es un sistema de fallas normales con el bloque de alto en el valle de Ixtlahuaca y bloque del bajo es la parte oriental de la sierra Mazahua. El desplazamiento vertical mínimo es de entre ca. 600 m y ca. 700 m con base en el desplazamiento de andesitas del Mioceno que están sepultadas en el valle de Ixtlahuaca (ver sección geológica A-B) (Figura 5.4).

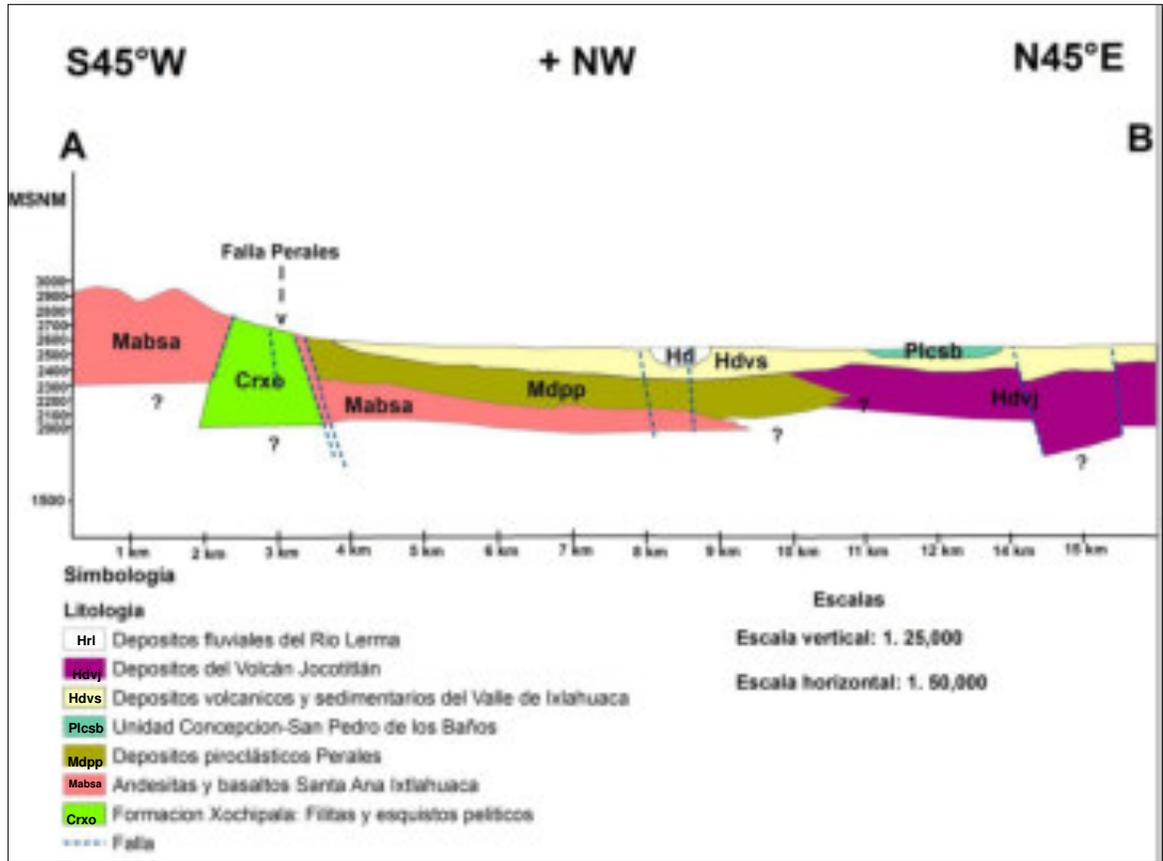


Figura 5.4 - Sección geológica A-B se puede ver que las rocas cretácicas y la unidad andesitas-basaltos Santa Ana están en el bloque del bajo del SFP y expuestas a una elevación de 2700 msnm y que los depósitos fluvio lacustres (bloque del bajo) en el valle de Ixtlahuaca están a una elevación de 2400 a 2550 msnm y se interpreta que las rocas cretácicas y andesitas-basaltos Santa Ana están a 500 m por debajo de los depósitos fluvio-lacustres, esto quiere decir que las fallas del SFP han desplazado verticalmente a estas unidades entre 600 m y 700 m.

En el núcleo de fallas del SFP hay presencia de brechas de falla (Figuras 5.5 y 5.8). Las brechas de fallas presentan mal clasificación en su granulometría y bloques angulosos a subangulosos de roca volcánicas intermedias. La composición de los bloques en la falla varía dependiendo de las rocas que afecta. El SFP afectó a las siguientes unidades: Formación Xochipala, ignimbrita San Miguel Yuxtepec, depósitos proclásticos Perales, andesitas-basaltos Santa Ana, Ignimbrita de la caldera El capulín, andesitas San Jerónimo Bonchete, volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca, y volcán La Guadalupana.

No afecto a las siguientes unidades: al volcán Purísima Concepción Mayorazgo, volcán San Antonio Mextepec. Estos volcanes se desarrollaron posteriormente al SFP ya que cubren a las fallas y no están deformados por estas (ver mapa geológico de la figura 4.1 y anexo 1).

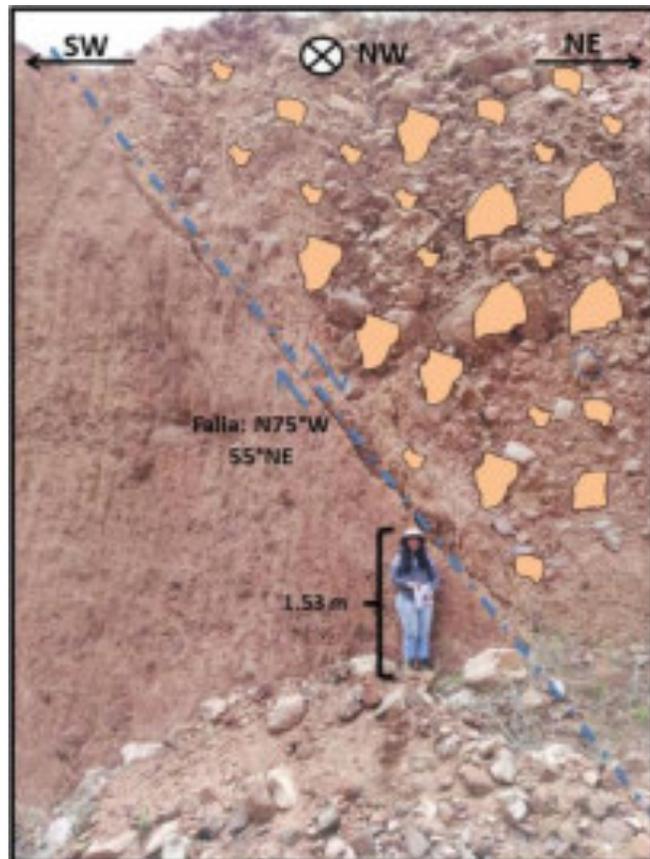


Figura 5.5 - Falla Perales con orientación NW-SE junto a un depósito de talud generado por el fallamiento de tipo normal.

En la localidad de Santa Ana Ixtlahuaca el SFP de orientación NW-SE es donde se intersecta con fallas del sistema NE-SW y con la terminación oriente de la falla Mazahua (descrita adelante), y además es una zona de varios deslizamientos, como el deslizamiento de San Isidro descrito en el capítulo de estratigrafía (Figura 4.22). En la localidad al suroeste de San Isidro Boxipe se encontro otra zona de fallas y

fracturas del SFP que tienen direcciones $N60^{\circ}W$ con echado de $70^{\circ}SW$ y que corta a derrames de andesita de la unidad de andesita-basalto Santa Ana (Figura 5.6).



Figura 5.6 - Zona de fallas y fracturas NW-SE antitéticas al SFP afectan a andesitas. Localidad de San Isidro Boxipe.

La última actividad del Sistema de Falla Perales que se considera en este trabajo y basados en sus relaciones de corte de las unidades estratigráficas es antes de la formación de los volcanes: San Antonio Mextepec y Concepción Mayorazgo. En este trabajo se correlaciona al volcán San Antonio Mextepec con la edad del cono de escoria Cerro Lashco en Atlacomulco de 0.4 ± 0.1 Ma (edad K-Ar, Suter et al., 1995) ya que presentan una similar litología y son ambos conos de escoria. En la parte sur del SFP es cortado por la falla Ixtlahuaca que a su vez corto rocas de las sierra de Las Cruces de ca. 3.7 Ma (Garcia-Palomo, 2008) significando que el SFP es más antiguo en actividad de fallamiento que ca. 4 Ma y además esto es soportado

porque corta a la unidad ignimbrita de la Caldera El capulín considerada de edad de 4 Ma por Corona-Chávez et al. (1999).

En este trabajo se propone que el sistema de fallas Perales es un sistema de fallas normales que ha tenido varias actividades de fallamiento en distintas edades y una primera actividad puede ser en el Oligoceno. Esto se infiere porque en algunas fallas del SFP se encontraron diques falla y vetas de cuarzo que son litológicamente similares a las vetas de cuarzo descritas en el distrito minero de Tlalpujahuá-El Oro (DIMITO) (Corona-Chávez et al., 2017) y que están encajonadas filitas y esquistos pelíticos de la Formación Xochipala (Figura 5.7). La segunda actividad de fallamiento pudo haber ocurrido en el Mioceno-Plioceno, ya que en muchos lugares a lo largo de las fallas NW-SE las unidades andesitas-basaltos Santa Ana se han visto afectados por estas fallas y se infiere una edad entre 4 y 3 Ma para esta actividad porque fallas NW-SE en la sierra de Las Cruces cortan a rocas de estas edades (Osete et al., 2000; García-Palomo et al., 2008) y también en el graben de Acambay se registra fallamiento E-W de edades cercanas a 4 Ma y 2 Ma (Aguirre-Díaz et al., 1999) que cortaron a fallas NW-SE. La última actividad del sistema de fallas Perales (SFP) fue en el Pleistoceno por la relación descrita con el volcán San Antonio Mextepec.

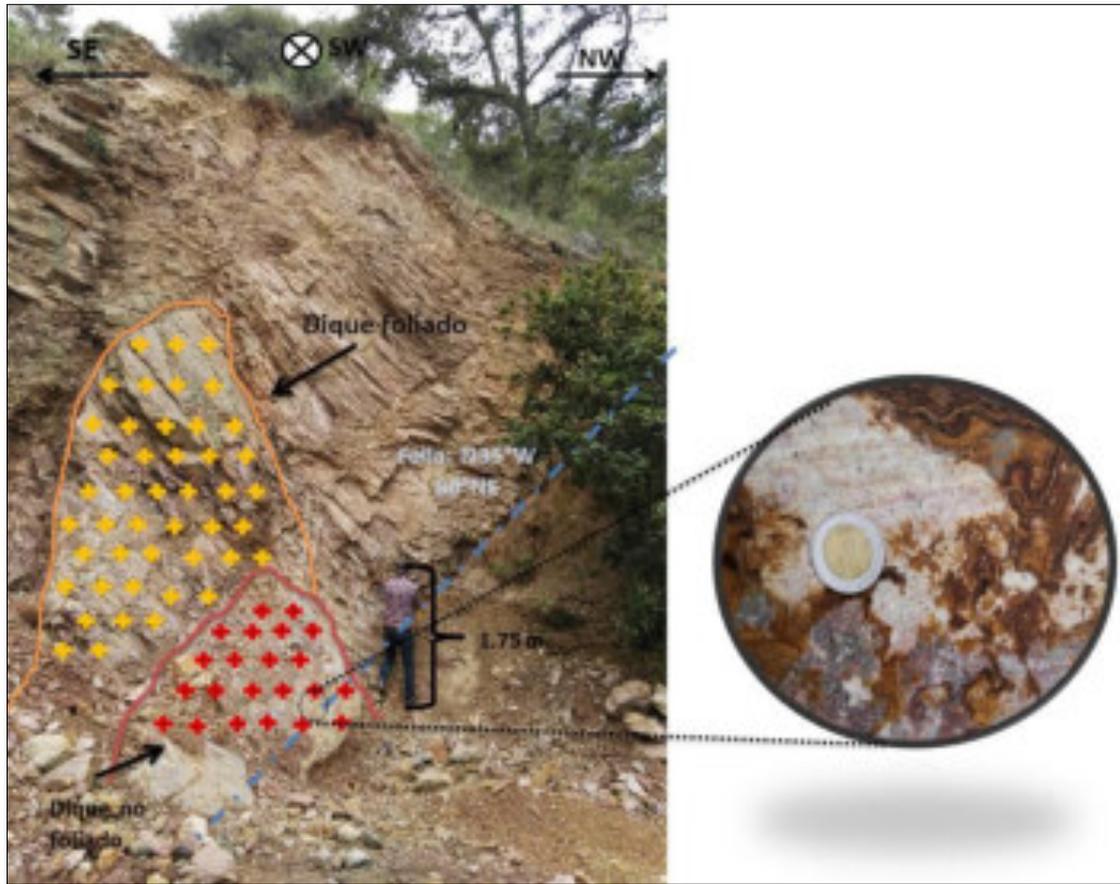


Figura 5.7 - Rocas metamórficas de la Formación Xochipala en escarpe del SFP cortadas por diques-falla de composición riolítica.

En las laderas de la parte oriente del volcan la Guadalupeana, fallas normales NW-SE del SFP son fallas escalonadas y al pie de los escarpes de estas fallas se han desarrollado depósitos de talud, estratificados con abanicos aluviales y deslizamientos antiguos (ver mapa geológico-estructural en anexos y figura 5.8). Esto sugiere la posibilidad de que las laderas desarrolladas al pie de los escarpes de fallas escalonadas normales están activas desde el punto de vista geomorfológico. No es clara la evidencia de que la falla pudiera estar activa y más que eso puede que las laderas estén activas ya que se observaron varios deslizamientos recientes con desarrollo de grietas NW-SE paralelos a la Falla Perales en la localidad de San Miguel Mextepec. El SFP por la orientación NW-SE que presenta se ha relacionado con el sistema de fallas Taxco-San Miguel de

Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002) y aunque esta entre dos sistemas de fallas E-W que están activas como es el sistema de Morelia-Acambay (Sunye-Puchol et al., 2015) y la falla Tenango (Norini et al., 2016) no hay una clara evidencia de que el SFP este activo desde el punto de vista geológico.

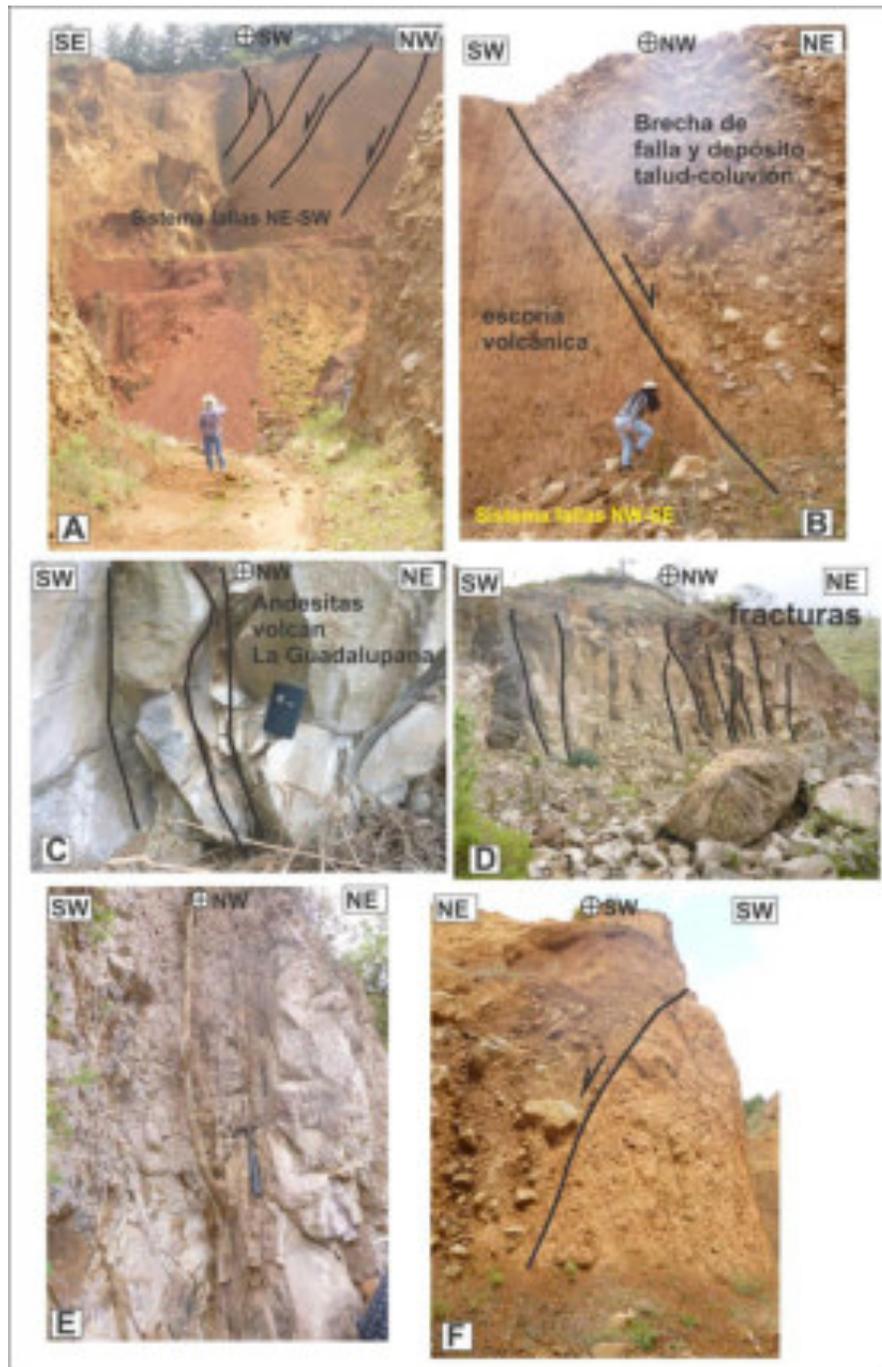


Figura 5.8 - Afloramientos de los sistemas de fallas a lo largo del escarpe de la falla Perales. A, sistema de fallas NE-SW cortan a cono piroclástico de escoria; B, falla NW-SE del sistema de fallas

Perales; C, fracturas y falla con brechamiento corta a andesitas del volcán La Guadalupana; D, fracturas sistemáticas cortan a andesitas de los volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca; E, fracturas y brechas de falla en escarpe de falla Perales en Santa Ana Ixtlahuaca; F, falla grande del sistema Perales.

5.1.1.2 Sistema de fallas NE-SW

En el sistema de fallas Perales existe un sistema de fallas que tienen direcciones NE-SW y que algunas fallas de este sistema cortan a las fallas NW-SE. Este sistema de fallas NE-SW esta presente a lo largo del escarpe de la falla Perales (ver mapa geologico-estructural figura 5.1 y anexo 2). La longitud de estas fallas varía de 300 m a 2 km, siendo las de mayor longitud en la zona de Santa Ana Ixtlahuaca que parece alcanzar ca. 6 km y es donde se ubica el deslizamiento San Isidro (Figura 4.22, descrito en estratigrafía).

El sistema de fallas NE-SW son fallas de tipo normal con orientaciones que varía de N35°E a N65°E con echados de 55° a 80° tanto al NW como al SE (figura 5.8); las fallas son de tipo normal y algunas fallas pueden tratarse de fallas de relevo de las fallas Perales NW-SE.

Estas fallas presentan desarrolladas en su nucleo brechas de fallas y afectan a las unidades que también afecta el sistema de fallas Perales NW-SE (Formación Xochipala, ignimbrita San Miguel Yuxtepec, depósitos piroclásticos Perales, andesitas-basaltos Santa Ana, Ignimbrita de la caldera El capulín, andesitas San Jerónimo Bonchete, volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca, y volcán La Guadalupana).

La edad de la actividad de estas fallas puede ser anteriores al sistema de fallas NW-SE y casi contemporáneas, esto por las relaciones estratigráficas y la relación con el sistema NW-SE. En varias partes a lo largo del escarpe del SFP algunas fallas NE-SW no cortan a estas fallas, pero en otros lugares sí cortan a fallas NW-SE.

En Santa Ana Ixtlahuaca el sistema de fallas NE-SW es más claro ya que las fallas se presentan en mayor numero y coincide con la terminación de la falla Mazahua (descrita adelante). En esta área existen muchas intersecciones de los sistemas de

fallas NW-SE y NE-SW lo que se expresa en una complejidad estructural y la presencia de deslizamientos y laderas activas desde el punto de vista geomorfológico con depósitos de talud, derrumbes y reptación de suelo.

5.1.2 Falla Mazahua

La falla Mazahua está localizada a lo largo de las comunidades de Santa Ana Ixtlahuaca, Fresno Nichi y Centro Ceremonial Otomí, estas dos últimas comunidades fuera del área de estudio. La falla tiene una longitud de ca. 14 km medidos de imagen satelital de Google Earth y parece cortar a la sierra Mazahua en dos partes (Figura 5.9).

La orientación de la falla Mazahua es N85°E-S85°W. La falla afecta a la unidad de andesitas-basaltos Santa Ana, a las andesitas del volcán La Guadalupeana y los volcanes de Santa Ana Ixtlahuaca. La presencia de deslizamientos antiguos y recientes en Santa Ana Ixtlahuaca sugiere que esta falla es parte causa de estos deslizamientos y sugiere que edad de la falla puede ser el Cuaternario. La dirección de la falla casi E-W se puede correlacionar en orientación con el sistema de fallas Acambay-Morelia y sugiere que la falla puede estar activa.



Figura 5.9 - Falla Mazahua con orientación N85°E

5.1.3 Fallas San Felipe

Las fallas San Felipe se localizan en los alrededores de la población San Felipe del Progreso y en el bloque del bajo del SFP. Las trazas de las fallas se extienden desde la población de Emilio Portes Gil hasta San Pedro Tlachichilpa con una longitud de ca. 12 km. Estas fallas tienen rumbos de N42°W a N58°W con echados que varían de 60° a 85° al NE y SW; son fallas de tipo normal.

Las fallas San Felipe cortan a rocas volcánicas de los volcanes Coajomulco-Tlachichilpa, volcán Til, volcán Los Arenales y volcán Jalpa. La edad de estos volcanes se interpreta que es Plio-Cuaternaria por lo que la edad de actividad de estas fallas debe estar dentro de este intervalo de tiempo. En algunos lugares se observó a estas fallas cubiertas por paleosuelos y depósitos de arenas y limos de abanicos aluviales (Figura 5.10).



Figura 5.10 - Fallas y fracturas San Felipe. A, fracturas y fallas que cortan a andesitas en las cercanías del volcán Til. B, fallas y fracturas NW-SE que son cubiertas discordantemente por paleosuelos y depósitos de cenizas volcánicas.

5.1.4 Falla San Pedro de los Baños

La falla San Pedro de los Baños se localiza en el valle de Ixtlahuaca entre las comunidades Concepción y San Pedro de los Baños (ver mapa geológico). La falla San Pedro tiene una longitud mínima de su traza de falla de 5 km con una orientación de N57°W con echado al NE; la dirección de echado fue inferida ya que la falla esta oculta, pero bascula a capas de la unidad Concepción-San Pedro de los Baños hacia el poniente (Figura 5.11). La falla se infiere pueda ser de tipo normal con base en este desplazamiento relativo de las capas de la unidad Concepción-San Pedro de los Baños. La falla y fracturas asociadas sirvieron de conducto para que fluidos hidrotermales salieran a la superficie.

La edad de la actividad de esta falla se infiere pueda ser durante el Holoceno ya que se consideró esta edad para la unidad Concepción-San Pedro de los Baños que fue discutida en la parte de estratigrafía y está afectada por esta falla.

Se interpretaron otros lineamientos estructurales adyacentes a la falla de San Pedro de los Baños y presentan la misma orientación SE-NW (ver mapa geológico o estructural); estos lineamientos estructurales se ven reflejados en el curso del río

Lerma, ya que sus meandros adquieren una geometría rectilínea y hay cambio de dirección abrupto en el cauce del río.



Figura 5.11 - Capas de areniscas de la unidad Concepción-San Pedro de los Baños que es basculada hacia el oriente por la falla San Pedro de los Baños. Iglesia de Concepción y San Pedro de los Baños.

5.2 Peligros geológicos

En este apartado se describirán los peligros geológicos identificados a lo largo del sistema de fallas Perales. Los peligros geológicos de acuerdo a la publicación del CENAPRED del 2001 titulada “Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México”, menciona que son aquellos fenómenos en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior de la Tierra o de la superficie de ésta los cuales son denominados fenómenos geológicos, estos podrían ser de manera general la sismicidad, vulcanismo, tsunamis, fallas geológicas, movimientos de laderas y suelos, entre otros.

En la falla Perales (sistema de fallas Perales) se han identificado tres peligros geológicos que son los deslizamientos, reptación de suelo y agrietamientos. Existen

otros peligros geológicos que se han identificado, pero están alejados de la falla Perales, por ejemplo, en el graben de Acambay relacionado con fallas activas y sismicidad (Sunye-Puchol et al., 2015) y actividad volcánica del Holoceno para el caso del estratovolcán Jocotitlán (Salinas-Sánchez et al., 2013) que se encuentra a 23 km de distancia. En la falla Perales no hay evidencia clara de sismicidad. Está claro que la actividad de una falla geológica puede conllevar diferentes peligros como son los deslizamientos, agrietamientos sismicidad, y algunos casos vulcanismo; pero para fines relacionados a la investigación de la Falla Perales solo se abordaran los deslizamientos, movimientos de suelo y formación de grietas.

5.2.1 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido (González-Vallejo et al., 2014). Los deslizamientos se pueden ver también como un mecanismo de remoción de masa y dentro de estos mecanismos están los desprendimientos, desplomes, deslizamiento, flujos, expansiones laterales y movimientos complejos (Alcántara-Ayala, 2000).

En los escarpes de falla del sistema de falla Perales se reconocieron varios tipos de movimientos de masa y/o movimientos del terreno como son desprendimientos o caídas, desplomes, deslizamientos y flujos (Figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15). En el capítulo de estratigrafía se describieron parcialmente algunas características de estos deslizamientos y el deslizamiento mayor en San Antonio Boxipe (Figura 4.22).

Los deslizamientos son peligros muy recurrentes en la zona de estudio por lo observado a lo largo de comunidades que habitan los escarpes del sistema de fallas Perales (ver mapa geológico en figura 4.1 y en anexo 1). Los factores que podrían estar íntimamente relacionados para la ocurrencia de estos procesos gravitacionales y de movimiento de terreno podrían ser la topografía de los escarpes

de falla, la pendiente o inclinación (buzamiento) y forma de las laderas, así como la combinación con la litología, las fallas secundarias, la vegetación, precipitación y suelo.

San Juan de las Manzanas-La Guadalupana

En el área que se encuentra entre San Juan de Las Manzanas y La Guadalupana se reconocieron una sucesión de varios escarpes y que presentan una morfología escalonada. Estos escarpes están relacionados con fallas normales escalonadas del sistema de fallas Perales NW-SE (ver mapa geológico en figura 4.1, anexo 1 y mapa de deslizamientos figura 5.16, anexo 3. En estos escarpes se reconocieron desprendimientos o caídas de rocas, algunos desplomes y deslizamientos (Figuras 5.12 y 5.15). En las laderas de menor pendiente se reconocieron depósitos sedimentarios de abanicos aluviales y que a veces cubren a deslizamientos anteriores.

Uno de los grandes deslizamientos que se puede apreciar en la zona de estudio es el que se encuentra al Sur de la comunidad de San Miguel de las Manzanas, presente en el mapa geológico como depósitos de coluvión y talud (Figura 5.12).



Figura 5.12 - Deslizamiento cerca de la comunidad de San Miguel de las Manzanas.

Santa Ana Ixtlahuaca y San Pedro El Alto

En el área de Santa Ana Ixtlahuaca y San Pedro El Alto se presenta una complejidad de fracturas y fallas, ya que se intersectan los sistemas de la falla Perales NW-SE y NE-SW, y la falla Mazahua. Esta complejidad geológico-estructural determina la presencia de varios tipos de movimientos de terreno. En este lugar se identificó el deslizamiento San Isidro que parece ser un deslizamiento y un flujo de rocas que

fue descrito en parte en el capítulo de estratigrafía (figura de deslizamiento San Isidro en la figura 4.22).

Otro deslizamiento es el localizado en la comunidad principal de Santa Ana Ixtlahuaca (zona centro) y a lo largo de la carretera asfaltada que sube hacia la población de La Guadalupana. En esta parte se reconocieron movimientos de terreno de tipo deslizamiento y flujo de suelos, ya que se observaron estos depósitos de gravedad por debajo de casas habitación (Figura 5.15) y la formación de grietas en el centro del pueblo.

Carretera a Santa Ana Nichi

En la subida del escarpe de la falla Perales por la carretera asfaltada de San Pedro El Alto hacia Santa Ana Nichi se observaron movimiento de terreno de tipo deslizamiento, desprendimientos y caídas de roca y desplomes (Figuras 5.13 y 5.15).

Otro de los grandes deslizamientos que se encontraron fue el cercano a San Pedro el Alto y que a su vez fue muy importante ya que irónicamente el deslizamiento de tierra y rocas nos ayudó a observar el Bloque riolítico el cual puede estar asociado a fallamiento. Este deslizamiento se suscitó en junio del 2017, acababa de ocurrir a escasos días de la visita en campo que se hizo, el deslizamiento se generó en el plano de falla correspondiente al de la Falla Perales como se puede observar en la figura 5.13, además se puede observar la cantidad de material desplazado y la magnitud de tal fenómeno ya que también traía árboles.



Figura 5.13- Deslizamiento de San Pedro el Alto en el cual se empalmaron dos fotografías del sitio para dimensionar el proceso gravitacional y la cantidad de material desplazado.

San Antonio y San Agustín Mextepec

En San Antonio y San Agustín Mextepec se observaron secuencias de diferentes tipos de depósitos sedimentarios debidos a movimientos de terreno como deslizamientos de bloques y arena, flujos de roca y desprendimientos de roca (Figuras 5.14 y 5.15). En algunos lugares del escarpe de la falla Perales se observó depósitos de abanicos aluviales encima de antiguos deslizamientos y a veces aparecían algunos depósitos de caída de ceniza volcánica encima de antiguos deslizamientos. Muchas viviendas están construidas sobre estos depósitos antiguos de movimiento de terreno.

En algunas casas de las comunidades de san Antonio y San Agustín Mextepec ubicadas en el escarpe de la falla Perales se encontraron por debajo de sus cimientos deslizamientos antiguos que tienen restos de cerámica prehispánica y se encontraron puntas de lanza de obsidiana (Figura 5.14). Estas evidencias de campo sugieren que estos movimientos de terreno han estado activos en épocas prehispánicas y no se sabe a ciencia cierta si este fenómeno terminó con víctimas humanas en ese tiempo.



Figura 5.14.- Deslizamiento con pedazos de cerámica y otros vestigios de una casa habitación arrastrados por un deslizamiento. En los diferentes zoom de la imagen se puede apreciar de la mejor manera, principalmente en el B).

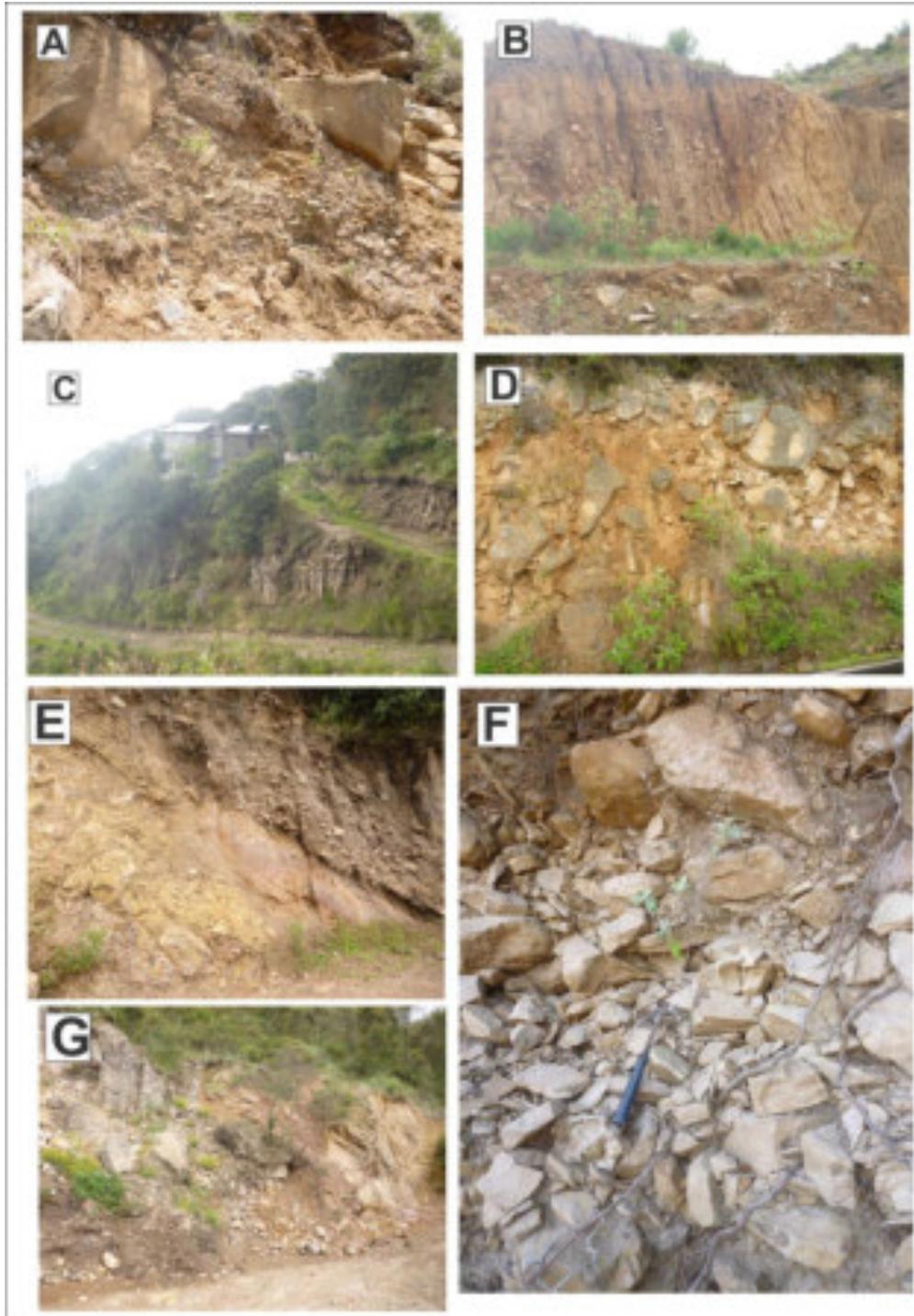


Figura 5.15 - Diferentes tipos de movimientos de terreno en el escarpe de la falla Peralas. A, Depósito de deslizamiento de rocas mezclado con gravas, localidad San Juan de las Manzanas-La Guadalupe. B, deslizamiento de rocas y depósitos de coluvión en falla normal del SFP, localidad San Juan de Las Manzanas-La Guadalupe. C, deslizamientos y abanicos aluviales, descansan cimientos de casas arriba, localidad de Santa Ana Ixtlahuaca. D, depósito de flujo de rocas o detritos

camino a Santa Ana Nichi. E, deslizamiento de lodo y rocas sobre rocas mesozoicas; carretera a Santa Ana Nichi. F, depósito de un flujo de rocas en San Antonio y San Agustín Mextepec. G, deslizamiento de rocas en la subida a Santa Ana Nichi.

Las causas de los anteriores movimientos de terreno a lo largo del escarpe de la falla Perales se propone que se han debido a una conjunción de diversos factores como son la presencia de las fallas normales del SFP, el porcentaje de pendiente elevado en los escarpes de falla, los movimientos de terreno que están activos, la cantidad de precipitaciones atmosféricas elevadas, el escaso desarrollo de material de vegetación en las laderas debido a lo delgado del suelo, altas velocidades de erosión, la deforestación de árboles de sostén del suelo en las pendientes y la modificación de la geomorfología natural por la presencia de casas habitación (geomorfología antropogénica).

Los anteriores resultados de la parte de tipos de movimientos de terreno en los escarpes del sistema de fallas Perales (falla Perales) justifica la importancia de contar con mapas de peligros y riesgos por movimientos de terreno a lo largo del escarpe.

En este trabajo se generó un mapa sencillo y preliminar de la ubicación y susceptibilidad de deslizamientos (Figura 5.16 y anexo 3). Este mapa se generó tomando como base las siguientes variables: uso de suelo, vegetación, edafología, pendiente, geología, fallas, fracturas y precipitación.

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos se usó el método multicriterio, mediante la matriz de decisión de Saaty (Márquez-Rosales. 1999) a través del modelo Método Analytic Hierarchy Process (AHP) de los geoprocusamientos de ArcMap, lo que hace esta herramienta es aplicar el método de Saaty en donde se genera una matriz, en la cual se comparan las diferentes variables unas con otras, dándole mayor peso a una según se compare con otra. Para fines de este mapa se asignaron los grados de susceptibilidad alta, media, baja y muy baja susceptibilidad.

En este mapa se puede apreciar como las zonas de mayor susceptibilidad a que ocurran deslizamientos se encuentran a lo largo del escarpe de la falla Perales, así como otras localidades expuestas a estos procesos de remoción en masa.

Este mapa puede servir en una primera instancia para que ayude a las autoridades a gestionar el territorio en función de las poblaciones y habitantes expuestos a la actividad de agentes geológicos y geomorfológicos que pueden originar riesgos geomorfológicos a lo largo del escarpe de la falla perales.



Figura 5.16 – Mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de falla (Ver en anexo 3).

5.2.2 Formación de grietas y fracturas (Agrietamientos)

Las grietas (agrietamientos) a diferencia de las fallas, son fracturas a lo largo de las cuales no se ha producido desplazamiento vertical apreciable (Tarbuk, 2005).

En este trabajo de tesis se exponen algunas características de las fracturas y grietas observadas en algunos lugares a lo largo del escarpe de la falla Perales (Figura 5.19 y anexo 4).

En San Antonio Mextepec se observaron grietas que están orientadas de manera paralela al rumbo de la Falla Perales, estructuras vistas en las paredes de casas habitación (Figura 5.17). Las grietas se presentaban con aperturas de 1 cm a 5 cm en algunos muros y con orientación NW-SE. Algunas casas colocaron troncos y retenes para sostener el movimiento de los muros y que las fracturas en los muros no siguieran ampliándose en su apertura. En otros lugares se observaron muros desplazados de su verticalidad (Figuras 5.17 y 5.18).



Figura 5.17 - Agrietamiento en casa en comunidad San Agustín Mextepec, la grieta (Línea segmentada) está orientada NW-SE.



Figura 5.18 - Casa agrietadas, se puede ver como los habitantes han implementados medidas para evitar el crecimiento de las grietas.

La causa del origen de estas fracturas y grietas en estas localidades que se observaron en campo se puede deber a movimientos de terreno y en específico deslizamientos. En los deslizamientos se desarrollan fracturas transversales a la dirección del deslizamiento.

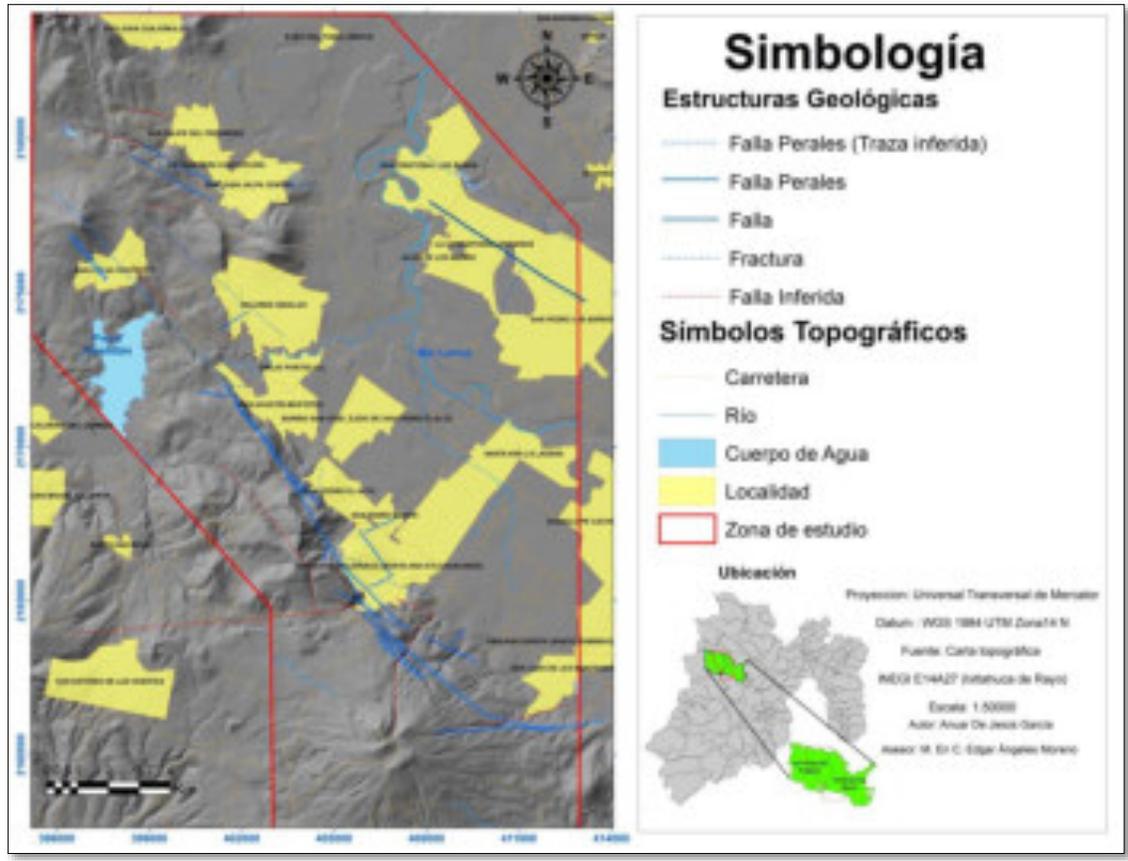


Figura 5.19 - Mapa grietas asociado a las fallas del sistema de fallas Perales presentes en localidades adyacentes (ver mapa en anexo 4)

5.2.3 Sismicidad

En la falla Perales no se observaron evidencias geológicas que sugieran que la falla está activa geológicamente hablando. En muchos lugares a lo largo de los escarpes se observó que las fallas normales NW-SE están cubiertas por depósitos de abanicos aluviales y depósitos de movimiento de terreno como los deslizamientos.

La falla Pastores del sistema de fallas de Acambay está a 20 km hacia la parte norte desde termina la falla Perales y que es la falla cercana activa desde el punto de vista geológico y sísmico (Sunye-Puchol et al., 2015).

La cercanía de fallas activas en el graben de Acambay añade un riesgo geológico indirecto, el que pueda haber un terremoto y que la energía de movimiento mecánica se propague hacia la falla Perales. Esta energía de movimiento podría activar fallas del sistema NW-SE y NE-SW y también desencadenar movimientos de terreno a lo largo del escarpe de la falla Perales y provocar deslizamientos que pueden afectar a las poblaciones que en los escarpes viven.

6. Conclusiones

En este trabajo por vez primera se presenta el mapa geológico, la estratigrafía y geología estructural de la falla Perales. La falla Perales presenta una variedad de rocas volcánicas como derrames lávicos andesítico-basálticos, rocas piroclásticas, y paleosuelos intercalados. En la falla Perales afloran bloques fallados del basamento Mesozoico y que están limitados por fallas geológicas de tipo normal.

La falla Perales, con base a la cartografía geológica y estructural, ha tenido diferentes fases sucesivas de actividad volcánica y estructural en distinto tiempo geológico. Se infieren actividades discretas en su en el Oligoceno, Mioceno, Plioceno y una última actividad en el Pleistoceno. La presencia de varias actividades de fallamiento sugiere que es una falla madura y tectónica.

La zona de falla perales funcionó como una zona importante de debilidad en la corteza, ya que a lo largo de su traza hay presencia de aparatos volcánicos que a su vez son de diferente composición y edad, lo que significa que el vulcanismo estuvo controlado estructuralmente por la falla.

El conocimiento geológico y estructural de la falla Perales, permitió identificar algunos peligros geológicos asociados a la presencia de las fallas del sistema de fallas Perales como son: deslizamientos y fracturamientos. Estos peligros geológicos se localizaron a lo largo del bloque del alto de la falla y en los escarpes de las fallas. Las fallas son de tipo normal en su mayoría.

Los resultados de este trabajo de tesis permiten concluir que la falla Perales no es activa ya que tuvo probablemente su última actividad de fallamiento antes de los ca. 400,000 años en el Pleistoceno medio, ya que su traza de falla es cubierta por el volcán San Antonio Mextepec el cual es de esa edad por correlación con el cerro Lashco (Suter et al., 1995).

La falla Perales presenta peligros geomorfológicos ya que su escarpe está activo geomorfológicamente hablando debido a la presencia de deslizamientos antiguos y recientes a lo largo de escarpes de fallas normales y se observaron abundantes tipos de procesos gravitacionales y de reptación de suelo que están afectando algunas comunidades y poblados a lo largo de su escarpe.

REFERENCIAS

Aguirre-Díaz J. G., Zúñiga R., Pierre L. Max-Langridge, R., Villamor P. & Persaud M., 2013, Preliminary paleoseismic results from the Pastores fault and its role in the seismic hazard of the Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, [en línea] 30(3), pp.463-481.

Aguirre-Díaz, G.J., McDowell, F.W., 1999, Volcanic evolution of the Amealco caldera, central Mexico. *Geological Society of America. Geological Society of America*, pp. 1-13

Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A.F., 2002, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, [en línea] LVII(1), pp. 65-82.

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., 1999, Effects of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt: Reply: *Geology* :27 (6), pp. 571–575.

Alarcon-Lopez, F.U., 2017, Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Ixtlahuaca, Estado de México, Servicio Geológico Mexicano, pp. 13-24

Alcántara Ayala, I., 2000, Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (41), pp. 7-25.

Colin-Rubio G. E., 2018, Geología de la falla Ixtlahuaca y sus controles estructurales sobre los Recursos Hídricos en los municipios de Ixtlahuaca y Jiupilco, Estado de México, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México.

Corona-Chávez, P., Salgado Soto, Z., Mennella, L., and Garduño Monroy, V.H., 1999, Carta geológico-minera Anganguero E14-A26 escala 1: 50 000 estado de Michoacán: Secretaría de Economía, Servicio Geológico Mexicano, p. 44.

Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y., Robles-Camacho, J., Lozano-SantaCruz, R., Martínez-Medina, M., 2017, Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, p. 250

Demant A., 1978, Características del Eje Neovolcanico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Instituto de Geología, *Revista*, Vol. 2, pp. 172-187.

Diaz-Duque J. A., 2012, Metodología de la investigación geofísica. Editorial ¿¿ pp. 168-178.

Elías-Herrera, M., 1993, Estratigrafía y recursos minerales del Estado de México: Gobierno del Estado de México-Universidad Nacional Autónoma de México, informe técnico, p 356.

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C.M., Manetti, P., 2000, Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, pp 161–185

Ferrari L., Lopez-Martinez M., Aguirre-Diaz G., Carrasco-Nunez G., 1999, Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *Geology*. vol. 27 (4), pp. 303–306.

Ferrari L, Garduño VH, Pasquaré G, Tibaldi A. 1994. Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to present. *Geofísica Internacional*. Vol. 33, Num 1, pp. 91-105.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: Tectonophysics. Vol. 522–523, pp. 122-149.

García-Palomo A., Juan-Zamorano J., López C., Galván A., Carlos-Valerio V., Ortega R. & Macías J., 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. v. 25, pp. 158-178

García-Palomo, A., Guerrero-Orozco, L. M, 2006, La zona de falla Tula-Mixhuca, una estructura importante dentro de la Cuenca de México (resumen), en Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana 26. Geos, Puerto Vallarta, Jalisco, México. vol.25, pp. 158-17.

Garduño-Monroy V.H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres G.M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 18, pp. 37-54.

Garduño-Monroy, V. y Pérez-Lopez, R. e Israde-Alcantara, I. y Rodríguez-Pascua, M. y Szykaruk, E. y Hernández-Madrigal, V. y García-Zepeda, M. y Corona-Chávez, P. y Ostroumov, M. y Medina-Vega, V. y García-Estrada, G. y Carranza, O. y Lopez-Granados, E. y Mora Chaparro, J., 2009. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central México. Geofísica Internacional, Vol. 48, pp. 319-335.

Gómez-Tuena A, Orozco-Esquivel M. T. & Ferrari L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario. Tomo LVII, pp. 227-283.

Gonzalez-Vallejo L. 2014, Ingeniería Geológica, Pearson Educación, S. A., España, pp 607-665.

Guerra-Peña, F., 2003, Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, pp. 42-66

Hernández M. & Lariz M., 2015, Actividad de una falla geológica superficial y registro de sus daños en edificaciones en Pabellón de Hidalgo, Aguascalientes. Investigación y Ciencia, vol. 23. Vol. 23, pp. 22-27.

Hernandez-Bernal M., Corona-Chávez P., Solís-Pichardo G., Schaaf P., Solé-Viñas J. & Molina J., 2015, Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico, International Geology Review. Vol. 58, pp. 603-625.

Israel-Alcantara, I., Miller, W.E., Garduño Monroy, V.H., Barron, J., Rodríguez-Pascua, M.A., 2010, Palaeoenvironmental significance of diatom and vertebrate fossils from Late Cenozoic tectonic basins in west-central Mexico: Vol. 219, pp. 79-94.

Johnson, C.A., Harrison, C.G.A., 1990, Neotectonics in central Mexico: Physics of the Earth and Planetary Interior. Volume 64, pp. 187-210.

Langridge M. R., Persaud M., Zúñiga F., Aguirre-Díaz G., Villamor P. & Lacan P., 2013, Preliminary paleoseismic results from the Pastores fault and its role in the seismic hazard of the Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 30, pp. 463-481.

Marquez-Rosales H., 1999, Metodos matemáticas de evaluación de factores de riesgo para el patrimonio arqueológico: una aplicación GIS del método de gerarquias analiuticas del T.L. Saaty. Vol. 8, pp. 21-37.

Martinez-Reyes J. & Nieto-Samaniego, 1990, Efectos Geológicos de la Tectónica Reciente en la Parte Central de México, UNAM, Instituto de Geología. Vol. 9, pp. 33-50.

Martínez-López, M. y Mendoza, C. (2016). Acoplamiento sismogénico en la zona de subducción de Michoacán-Colima-Jalisco, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 68, pp.199-214.

Norini G., Capra L., Borselli L., Zuñiga R., Solari L. & Sarocchi D., 2010, Large scale landslides triggered by Quaternary tectonics in the Acambay graben, Mexico, Earth surface processes and landforms. Vol. 35, pp. 1445-1455

Ortega R., Carciumaru D., Quintanar L. & Rubio R., 2015, Estimación del peligro sísmico en el centro de Baja California: Un modelo consistente entre las regiones del Golfo de California y la Peninsular. Sociedad Geologica Mexicana A. C. Volumen 67, pp. 87-102.

Ortiz M. A. & Bocco G., 1989, Análisis Morfotectónico de las Depresiones de Ixtlahuaca y Toluca, México. Geoboletín. Vol 28, pp. 507-530.

Osete, M., Ruiz-Martinez, R., Caballero, C., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Tarling, D., 2000, Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: palaeomagnetic and radiometric evidence, Instituto de Geofisica. Universidad Nacional Autonoma de México. Vol 30, pp. n/p.

Rojas-Ishikawa J. & Valverde-Tello J., 2010, Análisis de fallas geológicas y riesgo sísmico en la zona noroeste de lima mediante imágenes de satélite, Tesis.

Salinas-Sanchez, S., 2013, Geología, Petrología y Geoquímica del Volcan Jocotitlan, Estado de México. Tesis: UNAM.

Sanchez-Rubio, G., 1984, Cenozoic Volcanism in the Toluca-Amealco Region, Central México, Tesis: The University of London, pp. 35-52.

Sunye-Puchol I, Lacan P., Ortuño M, Villamor P, Audin L, Zúñiga F. R & Langridge R. M., Aguirre-Díaz G. de J. & Lawton F. L., 2015, La falla San Mateo: nuevas evidencias paleosismológicas de fallamiento activo en el graben de Acambay, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. pp. 361-376.

Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Farrar, E., 1995. The Acambay graben: Active intra-arc extensión in the Trans-Mexican volcanic Belt, México. *Tectonics* 14: 1245-1262.

Suter, M., Carrillo-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., 1996, Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the trans-Mexican volcanic belt, Mexico: *Seismological Society of America Bulletin*. Vol. 86, pp. 1952-1963.

Suter, M., Quintero, O., Johnson, C.A., 1992, Active Faults and State of Stress in the Central Part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico 1. The Venta de Bravo Fault. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 97, pp. 983-993.

Taner G. & Kaye M., 1999, Seismic hazard map of the western hemisphere, *Annali di Geofisica*. Vol. 42, pp. 1199-1213.

Urbina, F., Camacho, H. (1913). La Zona Megasísmica Acambay- Tixmadejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912: *Boletín de Instituto Geológico de México*, Vol. 32, p. 141.

Vázquez-Sánchez, E. & Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: *Geofísica Internacional*. Vol. 28, pp. 131-190.

Anexos

En el siguiente apartado se muestra la cartografía generada para fines de la tesis en el siguiente orden:

1.- Mapa Geológico

1.1.-Sección A-B

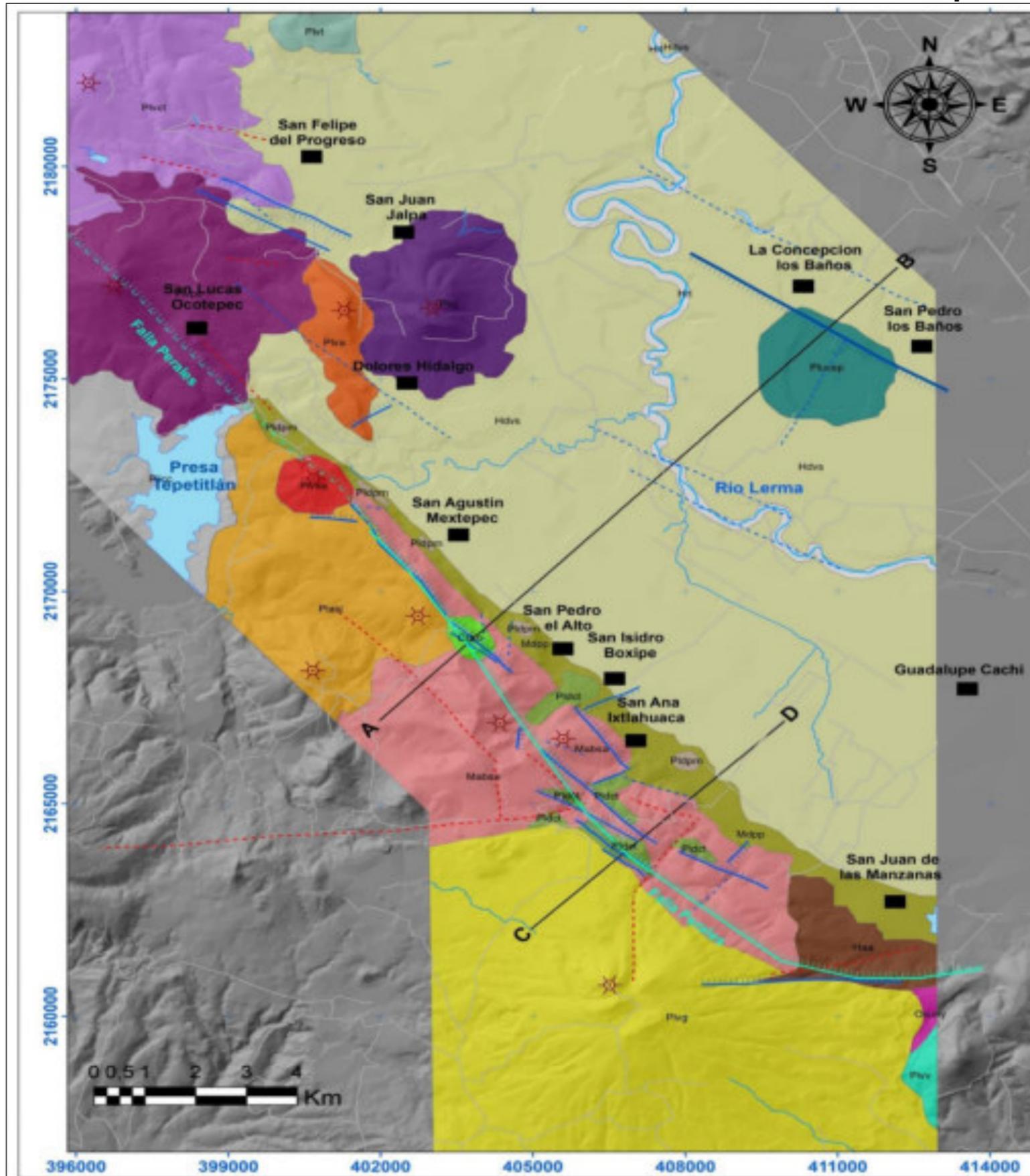
1.2.-Sección C-D

2.- Mapa Geológico-estructural

3.- Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

4.- Mapa de Agrietamientos

Anexo 1.- Mapa Geológico



Simbología

| | | |
|----------------------|--------|--|
| Plioceno-Cuaternario | Hrl | Depositos fluviales del Rio Lerma |
| | Hdvs | Depositos volcanicos y sedimentarios del Valle de Ixtlahuaca |
| | Haa | Abanicos aluviales |
| | Plidct | Depositos de coluvion y talud |
| | Plidpm | Depositos piroclasticos Mextepec |
| | Plvsa | Basalto del Volcan San Antonio Mextepec |
| | Plvv | Andesita del Volcan La Venta |
| | Plvg | Basalto del Volcan La Guadalupana |
| | Plasj | Andesitas San Jeronimo Bonchete |
| | Plvj | Basalto del Volcan Jalpa |
| | Plva | Basalto del Volcan Los Arenales |
| | Plvpc | Basalto del Volcan Purisima Concepcion de Mayorazgo |
| | Plvct | Basalto de los Volcanes Coajomulco-Tlalchichilpa |
| | Plvt | Basalto del Volcan Til |
| Oligoceno-Mioceno | Plcsb | Unidad Concepcion-San Pedro de los Baños |
| | Plicc | Ingnimbrita de la caldera El Capulin |
| | Mdpp | Depositos piroclasticos Perales |
| Cretácico | Mabsa | Andesitas y basaltos Santa Ana Ixtlahuaca |
| | Olismy | Ignimbrita San Miguel Yuxtepec |
| | Crxo | Formacion Xochipala: Filitas y esquistos peliticos |

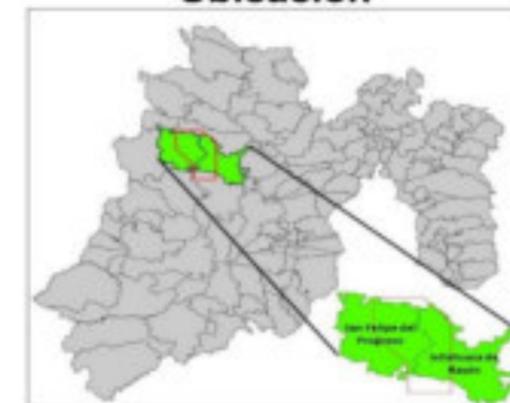
Estructuras Geológicas

- Volcán
- Falla Perales
- Falla Perales (Traza inferida)
- Falla
- Falla inferida
- Fractura
- Perfiles

Símbolos Topográficos

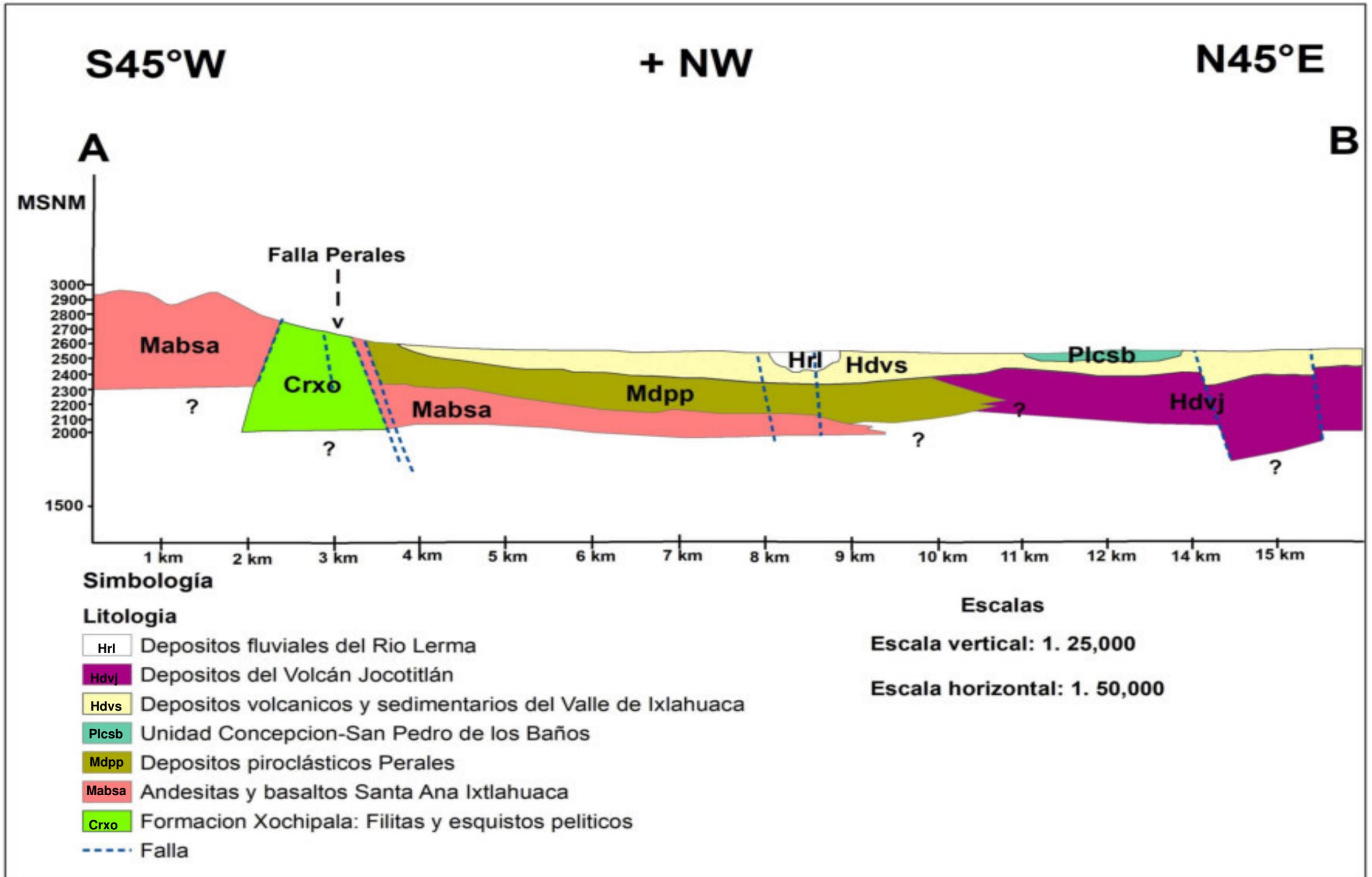
- Carretera
- Rio
- Cuerpo de Agua
- Localidades representativas

Ubicación

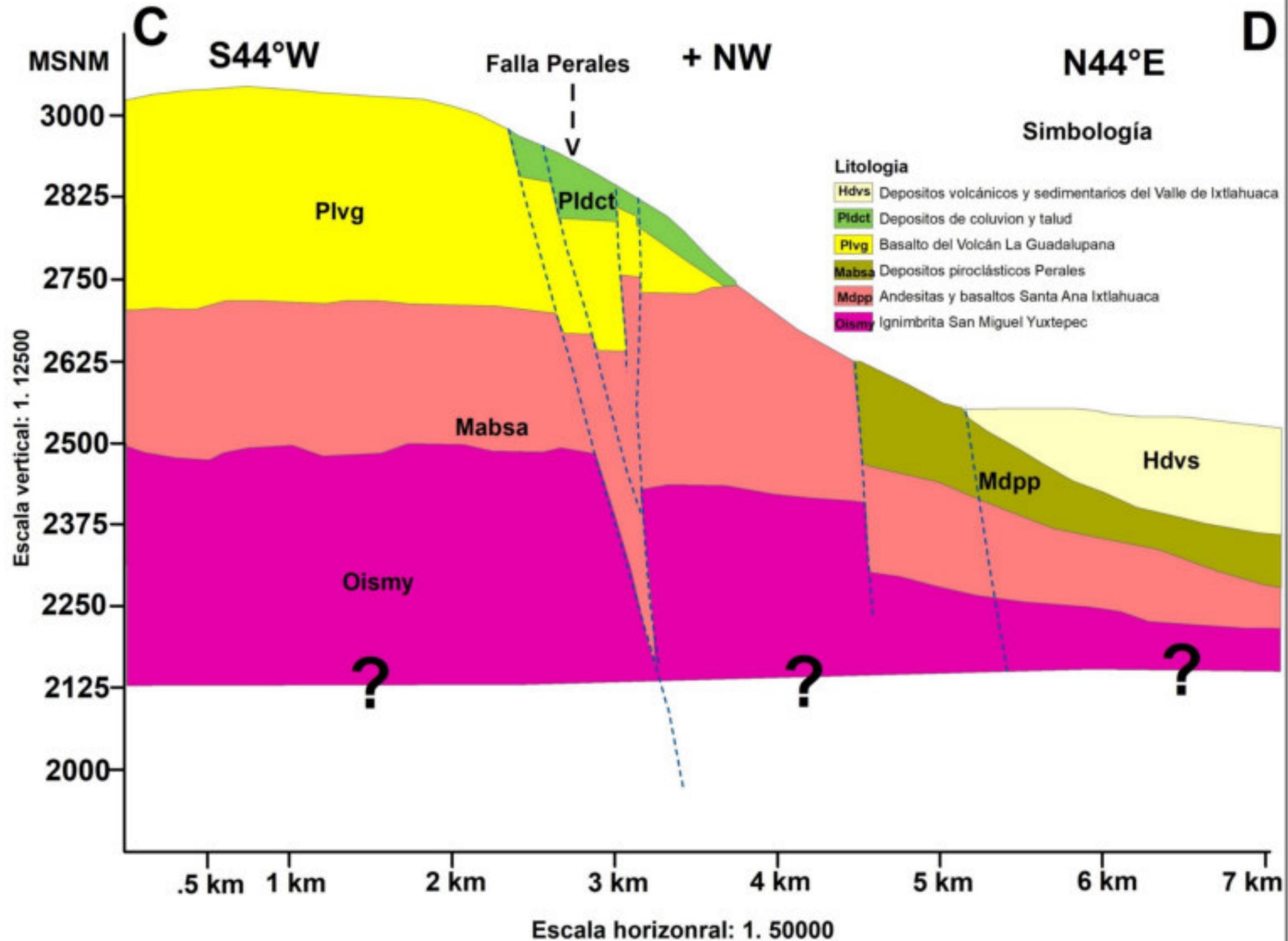


Proyeccion: Universal Transversal de Mercator
 Datum : WGS 1984 UTM Zona14 N
 Fuente: Carta topográfica
 INEGI E14A27 (Ixtlahuaca de Rayo)
 Escala: 1.50000
 Autor: Anuar De Jesús García
 Asesor: M. En C. Edgar Angeles Moreno

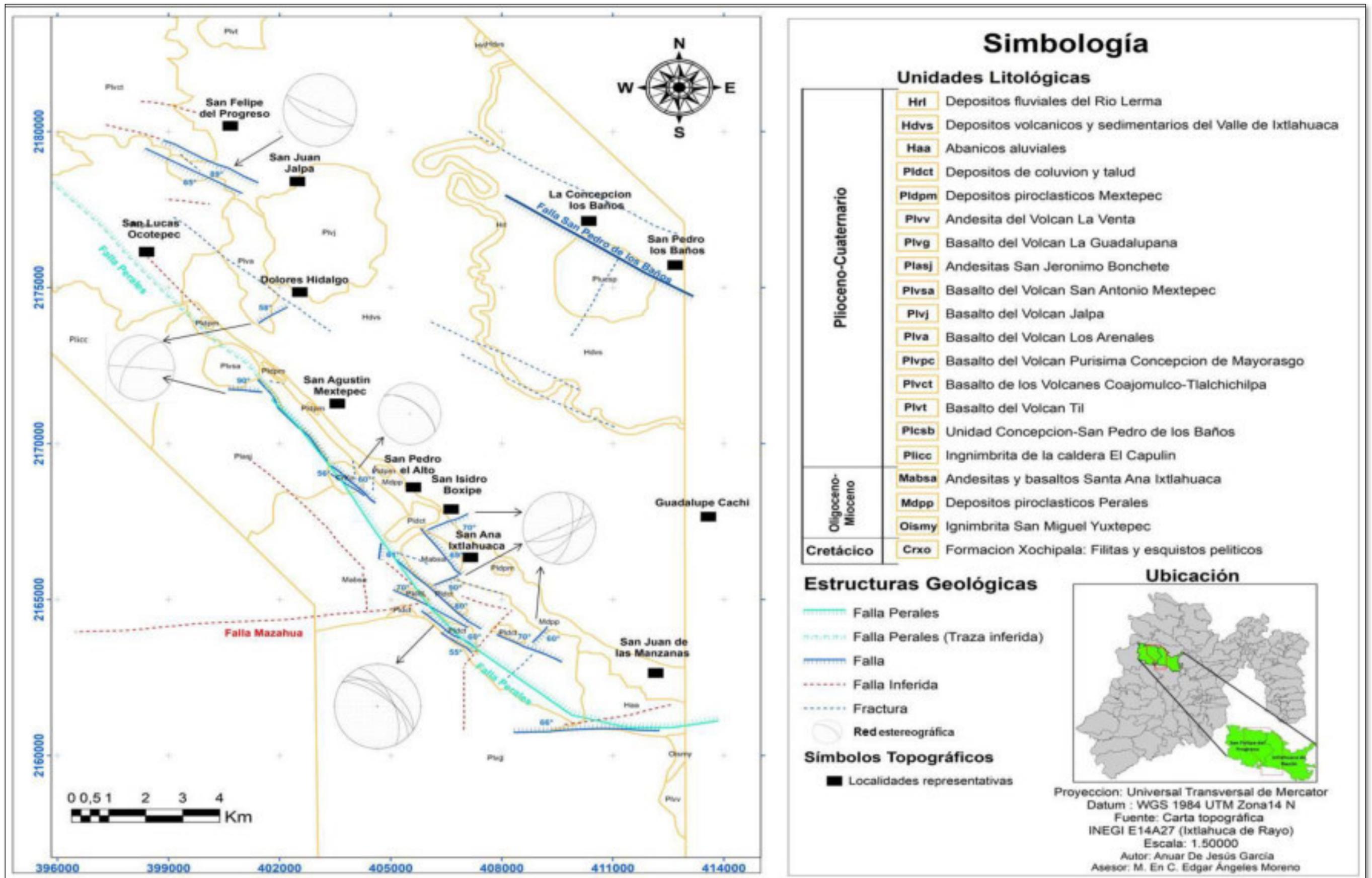
Anexo 1.1.- Sección A-B



Anexo 1.2.- Sección C-D

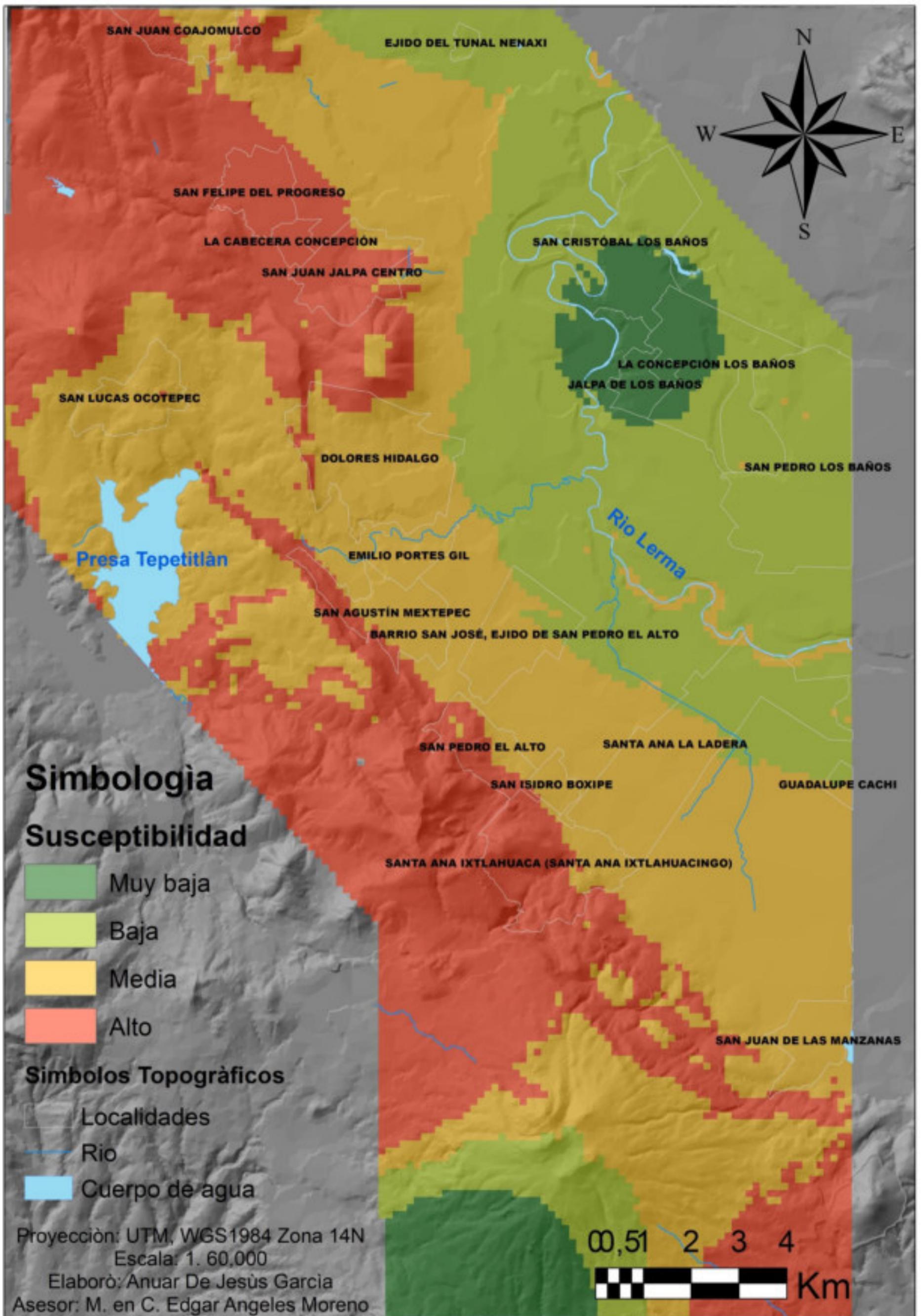


Anexo 2.- Mapa Geológico-estructural



Anexo 3.- Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS



Anexo 4.- Mapa de Agrietamientos

