



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

LICENCIADO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

T E S I S

**“GEOLOGÍA DE LA FALLA IXTLAHUACA Y SUS CONTROLES
ESTRUCTURALES SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LOS MUNICIPIOS
DE IXTLAHUACA Y JIQUIPILCO, ESTADO DE MÉXICO”**

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

PRESENTA

GRECIA ESMERALDA COLIN RUBIO

ASESOR

M. EN C. EDGAR ANGELES MORENO

REVISORES

DR. EN I. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO

DR. EN C. HÉCTOR VÍCTOR CABADAS BÁEZ

Toluca, Estado de México, octubre de 2018.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento y justificación del problema	1
1.2 Hipótesis	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Área de Estudio	2
CAPÍTULO 2 Metodología.....	4
2.1 Investigación documental	4
2.2 Cartografía y fotointerpretación geológica.	4
2.3 Geología de campo.....	5
2.4 Análisis geológico-estructural y sus controles en hidrogeología.....	7
CAPÍTULO 3 Marco Teórico	10
3.1 Parte central de la Faja Volcánica Transmexicana	10
3.2 Bloque Norte y Centro de la Sierra de las Cruces	11
3.3 Estratigrafía de la Cuenca del Valle de Ixtlahuaca.....	12
3.4 Fallas en la Cuenca del Valle de Ixtlahuaca	13
3.5 Relaciones entre falla geológicas y acuíferos.....	14
3.6 Características hidrogeológicas de los acuíferos del Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco y Valle de Toluca	17
3.6.1 Acuífero del Valle de Toluca.....	17

3.6.2 Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco	18
CAPÍTULO 4 Resultados: Estratigrafía.....	20
4.1 Ignimbritas San Miguel Yuxtepec.....	21
4.2 Depósitos Piroclásticos Perales.....	23
4.3 Andesitas y Basaltos de Santa Ana.....	23
4.4 Complejo Volcánico Sierra de las Cruces.....	24
4.4.1 Flujos piroclásticos Jiquipilco.....	24
4.4.2 Flujos piroclásticos Portezuelo	27
4.4.3 Derrames de Lava Andesítica Los Lobos	28
4.5 Basaltos y Andesitas La Guadalupeana	30
4.6 Unidad San Lorenzo Toxico.....	32
4.7 Domos Santuario	36
4.8 Flujos Piroclásticos San Antonio Bonixi	39
4.9 Unidad Llano Grande.....	42
4.10 Volcán la Venta.....	43
4.11 Unidad Lacustre Toxico	46
4.12 Abanicos Aluviales Santuario	49
4.13 Depósitos fluviales Santa Isabel	50
4.14 Depósitos volcánicos y Fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca.....	51
4.15 Depósitos fluviales del Río Lerma.....	53
CAPÍTULO 5 Resultados: Geología Estructural	55
5.1 Sistema de fallas Ixtlahuaca (SFI)	56
5.1.1 Falla Ixtlahuaca (FI).....	56
5.1.2 Fallas menores	58
5.2 Sistema de fallas Toxico (SFT).....	62
5.3 Sistema de fallas NW-SE.....	65
5.3.1 Fallas San Jerónimo	67
5.4 Sistema de fallas de la Sierra de las Cruces (SFSC).....	68

CAPÍTULO 6 Resultados: Controles Estructurales en la Hidrogeología de la Falla Ixtlahuaca	72
6.1 Hidrogeología general del área de estudio	72
6.1.1 Medio geológico poroso.....	73
6.1.2 Medio geológico fracturado	74
6.1.3 Acuitardo	74
6.2 Dominios de patrones de drenaje superficiales en la falla Ixtlahuaca.....	75
6.3 Secciones geológicas transversales a la falla Ixtlahuaca: Controles estructurales subterráneos	80
CAPÍTULO 7 Conclusiones	84
REFERENCIAS	86
ANEXOS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de localización de la zona de estudio.....	03
Figura 2.1	Esquema metodológico de este trabajo de investigación.....	09
Figura 3.1	Ubicación Regional de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005).....	10
Figura 3.2	Ubicación de la falla Ixtlahuaca en el contexto geológico estructural de la Sierra de las Cruces (Modificado de García-Palomo et al., 2008).....	12
Figura 3.3	Efectos de las fallas en el agua subterránea (Singhal y Gupta, 1999).....	16
Figura 4.1	Mapa Geológico del área de estudio.....	20
Figura 4.2	Ignimbrita San Miguel Yuxtepec aflorando en la parte sur de los Domos El Santuario; la ignimbrita presenta fracturada y afallada.....	22
Figura 4.3	Ignimbrita San Miguel Yuxtepec aflorando a la base de un arroyo al NW de las laderas del Cerro la Venta. Esta ignimbrita se presenta basculada, fracturada y afallada. Las fracturas siguen un rumbo E-W.....	22
Figura 4.4	Flujo piroclástico de bloques y ceniza de composición andesítica. Estructura masiva y mal clasificado. Este depósito sobreyace un flujo de pómez y ceniza que se puede ver en el estrato 1 de 40 cm de espesor. En la capa superior en el afloramiento (estrato 2), se observa un flujo piroclástico de clastos de andesita de mayor tamaño y presencia de ceniza.....	25

Figura 4.5	Flujo piroclástico de pómez y ceniza ubicado entre los domos Santuario y Jiquipilco. A, expresión geomorfológica en lomas alargadas E-W del flujo piroclástico; B, depósitos de ceniza de caída y oleadas piroclásticas intercaladas con el flujo de pómez y ceniza; C, estratificación de depósitos de caída con flujos de bloques, pómez y ceniza y pómez y ceniza; D, depósitos andesíticos de bloques, pómez y ceniza.....	26
Figura 4.6	Este afloramiento presenta un depósito de lahar, con clastos de andesitas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda. Los clastos encuentran redondeados y subangulosos, presentado intercalaciones de ceniza volcánica.....	27
Figura 4.7	En relación con la imagen A se presenta un flujo piroclástico de ceniza, pómez y clastos de andesitas y además se observaron chimeneas de elutriación (desgasificación) como se muestra en la imagen B, representando el proceso de enfriamiento del flujo.....	28
Figura 4.8	La fotografía superior muestra derrames lávicos y autobrechas de composición andesítica con una textura porfídica. Las andesitas presentan cristales de hornblenda oxidada.....	29
Figura 4.9	Derrame de lava andesítico-basáltica del volcán La Guadalupana.....	30
Figura 4.10	Depósitos piroclásticos andesíticos en las faldas del volcán La Guadalupana. En la capa A se presenta un paleosuelo que es sobreyacido por un depósito piroclástico con pómez y ceniza (B) y posteriormente se tiene un depósito de caída de ceniza (C) que presenta fragmentos de plagioclasas y vidrio volcánico.....	31

Figura 4.11	Unidad San Lorenzo Toxico. A, secuencia de oleadas piroclásticas con bloques de lacustres, se observan superficies quemadas en los depósitos lacustres; B, laminaciones cruzadas en oleadas piroclásticas de pómez y ceniza; C, flujo de pómez y ceniza con intraclastos lacustres y ceniza volcánica; D, laminaciones cruzadas y paralelas de oleada piroclástica; E, flujo piroclástico pómez y ceniza con bloques de andesita, dacita y antiguas rocas piroclásticas; F, capas de lacustres y cenizas retrabajadas inmersas en flujo piroclástico; G, bloque de lacustres y cenizas volcánicas dentro de flujo piroclástico de pómez y ceniza.....	34
Figura 4.12	Secuencia de flujos piroclásticos, en la capa 1 se encuentra un flujo piroclástico de pómez y ceniza, donde en la segunda imagen se observa el flujo de manera detallada, en la capa 2 se presenta un flujo de mayor espesor de pómez y ceniza con presencia de oleadas piroclásticas, por último, la capa 3 son depósitos de ceniza.....	35
Figura 4.13	Se pueden observar los afloramientos de andesitas en el norte de los Domos Santuario, cerca de Santa Cruz Tepexpan.....	37
Figura 4.14	Afloramiento de andesita con cristales de plagioclasa, hornblenda y biotita. Este afloramiento está ubicado entre los domos San Miguel y El Águila en las cercanías de San Miguel Yuxtepec.....	37
Figura 4.15	Afloramiento en el poblado de San Miguel Yuxtepec, se observaron andesitas intemperizadas con anfíboles, biotitas y plagioclasas, en una matriz con vidrio volcánico.....	38

Figura 4.16	En la parte poniente de los domos, San Miguel Yuxtepec se observaron andesitas con texturas más afaníticas con presencia de epidotas y azufre y presencia de fallamiento.....	38
Figura 4.17	En la parte norte del domo Santuario, Santa Cruz Tepexpan, se presenta una secuencia de flujos piroclásticos. A, flujo de bloques y ceniza; B, depósito de caída de ceniza; C, flujo de bloques de andesitas y ceniza; D, flujo de ceniza con clastos de andesita y por último E es un depósito de caída de ceniza.....	40
Figura 4.18	Flujos piroclásticos San Antonio Bonixi ubicados en San Antonio. 1 depósito de caída de ceniza de composición andesítica; 2, flujo piroclástico con bloques de andesita de hasta 10 cm.....	40
Figura 4.19	Afloramiento de flujos piroclásticos San Antonio Bonixi al sur de San Antonio. Este afloramiento presenta mayor proporción de ceniza, y pequeños clastos de andesitas.....	41
Figura 4.20	Se puede ver en la imagen los flujos piroclásticos San Antonio Bonixi. En la capa A, el flujo es de bloques andesíticos y ceniza volcánica; en la capa B se puede observar un paleosuelo que cubre al flujo piroclástico; en la capa C corresponde a un depósito de caída de ceniza volcánica y en la capa D se presenta un conglomerado con matriz de arena fina.....	41
Figura 4.21	Depósito de caída de pómez.....	42
Figura 4.22	Planicie de depósitos piroclásticos de Llano Grande.....	43

Figura 4.23	Se presenta una secuencia de depósitos piroclásticos afectados por una falla. 1, depósitos de ceniza con líticos de andesita; 2, depósitos de pómez con líticos de andesitas y 3, depósitos laminados de caída de pómez y líticos volcánicos.....	44
Figura 4.24	Derrames de lava andesítica autobrechados con plagioclasas como fenocristales.....	44
Figura 4.25	Depósito piroclástico de ceniza y pómez.....	45
Figura 4.26	Depósitos piroclásticos en volcán La Venta. 1, depósito piroclástico de pómez y 2, depósito piroclástico con bloques de andesita con una matriz de ceniza.....	45
Figura 4.27	Unidad lacustre Toxico. A, secuencia de depósitos lacustres, fluvio-lacustres y paleosuelos; B, unidad San Lorenzo Toxico de oleadas piroclásticas subyace a depósitos fluvio-lacustres de la unidad lacustre Toxico; C, secuencia de limos arcillosos y paleosuelos de la unidad lacustre Toxico; D, gravas y arenas gruesas con líticos volcánicos y pómez redondeados de la unidad lacustre Toxico; E, capas de gravas y arenas con laminación cruzada.....	47
Figura 4.28	Depositos lacustres y paleosuelos de la unidad lacustre Toxico sobreyaciendo a flujos piroclásticos de bloques y ceniza de la unidad San Antonio Bonixi. A, flujo piroclástico de bloques y ceniza; B se ve un pequeño paleosuelo y C, depósito lacustre y depósito de ceniza.....	48
Figura 4.29	Abanicos aluviales Santuario, la imagen a la derecha corresponden a los abanicos cerca de San Miguel Yuxtepec y a la izquierda a los abanicos cerca de Santa Cruz Tepexpan.....	49

Figura 4.30	Depósito de abanico aluvial en San Martín Morelos, con clastos de andesitas se presenta una matriz de arena gruesa.....	49
Figura 4.31	Depósitos fluviales Santa Isabel que sobreyacen a depósitos piroclásticos. Los clastos en el depósito fluvial son de andesita y se observan fragmentos de roca piroclástica incluido en el depósito fluvial.....	50
Figura 4.32	Cerca de Portezuelo, se observó este depósito fluvial de la unidad Santa Isabel. Esta constituido de clastos redondeados de andesitas y presentando arenas de grano medio.....	51
Figura 4.33	Columna estratigráfica del Valle de Ixtlahuaca elaborada por DeJesús-García. (2018) a partir de sus resultados y la compilación de datos geológicos de los trabajos: Sánchez-Rubio, 1984; Israde-Alcántara et al., 2010; Salinas-Sánchez, 2013.....	52
Figura 4.34	Río Lerma al Sur de la falla Ixtlahuaca.....	54
Figura 4.35	Se observa diferentes estratos de caída de ceniza, sobre este flujo de pómez y por último un conglomerado con clastos de andesitas, en una matriz arenosa.....	54
Figura 5.1	Mapa Geológico-Estructural de la falla Ixtlahuaca.....	55
Figura 5.2	La imagen A muestra las fallas en las ignimbritas orientadas al SW y SE mientras que en la B se observa una falla E-W en una brecha de falla.....	59
Figura 5.3	Falla Ixtlahuaca en ignimbritas ubicadas al NW del Volcán la Venta.....	60

Figura 5.4	En la figura A se aprecian flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi afectados una falla E-W con echado de 90°. La figura B muestra una falla E-W, 65°S afectando a andesitas de los domos Santuario y que se encuentra en una zona de falla ya que abundan fracturas alrededor de está. En la figura C, muestra dos fracturas con rumbos NE-SW y NW-SE, que afectan flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi.....	61
Figura 5.5	Sistemas de fallas NE-SW y NW-SE en la parte norte de los domos Santuario. La imagen A presenta a la falla con actitud estructural de N35°W, 60°NE (punto de observación FI100) que afecta a flujos piroclásticos que sobreyacen a andesitas hipabisales. La figura B presenta fracturas en las andesitas hipabisales de los domos. La figura C muestra fracturas NE-SW en andesitas.....	63
Figura 5.6	Fractura con rumbo de S48°W, afectando bloques de andesitas-basálticas en los domos Santuario (punto de observación FI09).....	64
Figura 5.7	Falla con actitud estructural S45°W, 72°NW, que afecta los flujos piroclásticos de bloques y ceniza (punto de observación FI80).....	64
Figura 5.8	Fallas NW-SE en la zona de San Lorenzo Toxico. En figura de la izquierda se muestran a las fallas NW-SE que afectan a depósitos piroclásticos de la unidad San Lorenzo Toxico: círculo A depósito de caída de ceniza y círculo B flujo piroclástico. La imagen de la derecha muestra una fractura en los depósitos de caída de ceniza con orientación N50°W (punto de observación FI18).....	66

Figura 5.9	Fallas NW-SE entre San Lorenzo Toxico y San Antonio Bonixi. Se muestra una falla N40°W, 56°NE que corta a flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi y es sobreyacida por depósitos fluvio-lacustres (punto de observación FI80).....	66
Figura 5.10	Falla normal N38°W, 74°NE, afectando a las andesítas de los domos Santuario (punto de observación FI11).....	67
Figura 5.11	Sistema de fallas NW-SE que incluyen a la falla San Jerónimo y que se interpreta en este trabajo como una zona de relevo estructural antigua de la falla Ixtlahuaca que ha sido reactivada por el sistema de fallas Toxico.....	68
Figura 5.12	En la foto se muestra zona de falla Jiquipilco y una falla con actitud estructural S35°W, 50°NW que corta a los derrames andesíticos Los Lobos de la SC.....	70
Figura 5.13	Rocas volcánicas en la zona de daño de la falla Jiquipilco. Flujos de autobrechas andesíticas en imagen del lado izquierdo. En la imagen del lado derecho se muestra flujos de autobrechas andesíticas (A) que son sobreyacidos por flujos piroclásticos de Jiquipilco (B).....	70
Figura 5.14	Falla al NE-SW que corta los derrames de lava andesítica Los Lobos, se muestra acercamiento en la imagen derecha.....	71
Figura 5.15	En la parte sur de la población de Jiquipilco, flujos piroclásticos Portezuelo cortado por fallas E-W y NW-SE. El flujo piroclástico presenta pómez y clastos de andesitas en una matriz de ceniza.....	71
Figura 6.1	Mapa esquemático hidrogeológico.....	73
Figura 6.2	Mapa de dominios de patrones de drenaje superficial de la falla Ixtlahuaca.....	76

Figura 6.3	Sección geológica A – B. Muestra fracturas y nivel freático de pozos de agua.....	81
Figura 6.4	Sección geológica C – D. Muestra fracturas y nivel freático de pozos de agua.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Información hidrogeológica del Acuífero del Valle de Toluca.....	18
Tabla 3.2	Información hidrogeológica Acuífero del Valle de Ixtlahuaca-Atlahcomulco.....	19

ABREVIATURAS

(N) Norte

(S) Sur

(E) Este

(W) Oeste

(CVI) Cuenca del valle de Ixtlahuaca

(AVT) Acuífero del valle de Toluca

(AIA) Acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco

(INEGI) Instituto Nacional de Estadística y Geografía

(IFOMEGEM) Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México

(SGM) Servicio Geológico Mexicano

(CONAGUA) Comisión Nacional del Agua

(FVTM) Faja Volcánica Transmexicana

(SFTSMA) Taxco-San Miguel de Allende

(SC) Sierra de Las Cruces

(CVI) Cuenca del Valle de Ixtlahuaca

(SFI) Sistema de fallas Ixtlahuaca

(FI) Falla Ixtlahuaca

(SFT) Sistemas de fallas Toxico

(SFSC) Sistema de fallas se la Sierra de las Cruces

RESUMEN

En este trabajo se expone la geología para la falla Ixtlahuaca, ubicada en el Estado de México y dentro de los municipios de Ixtlahuaca y Jiquipilco. La falla Ixtlahuaca es un límite geológico-estructural (E-W) entre el acuífero del Valle de Toluca y el acuífero del Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco. Ya que existen pocos estudios que han considerado la influencia de las propiedades geológicas y/o de las estructuras como fallas en los acuíferos de las cuencas del Valle de Toluca e Ixtlahuaca y que generalmente se debe a la falta de un conocimiento detallado de las secuencias estratigráficas involucradas y de fallas geológicas, se planteó el objetivo principal de cartografiar geológicamente la falla y sus estructuras asociadas para poder relacionar esta información con los recursos hídricos superficiales y subterráneos en partes adyacentes a esta falla.

Las metodologías aplicadas para lograr el objetivo principal comprendieron las referentes a investigación documental, fotointerpretación geológica, cartografía geológica, geología de campo, estratigrafía, geología estructural y el análisis estructural en relación con la hidrogeología (corrientes superficiales y compilación de algunos pozos de agua subterránea).

Este trabajo se definió la estratigrafía y geología de la falla Ixtlahuaca y de sus alrededores. Las unidades geológicas informales que se definieron son rocas volcánicas, sedimentarias y volcanosedimentarias que van en edad del Oligoceno al Cuaternario para el bloque del alto y del bajo de la falla Ixtlahuaca. En la zona se definieron varios sistemas de fallas y fracturas como la traza de la falla Ixtlahuaca (E-W), el sistema de fallas Toxico con orientación NE-SW, sistemas de fallas NW-SE y la falla San Jerónimo (NW-SE).

La última parte de este trabajo consistió en elaborar un mapa hidrogeológico básico del entorno de la falla Ixtlahuaca, analizar las geometrías de los patrones de drenaje de las corrientes de aguas superficiales y elaborar dos secciones geológicas transversales a la falla Ixtlahuaca. Los resultados del análisis de patrones de drenaje

permitieron encontrar diferentes dominios de patrones de drenaje y que tienen relación con los sistemas de fracturas y fallas definidos en este trabajo. El análisis integrativo de estratigrafía, geología estructural, hidrogeología y secciones geológicas soportadas con pozos de agua subterránea, permitió encontrar que la falla Ixtlahuaca es una frontera hidráulica en su mayor parte a lo largo de su traza E-W; sin embargo en el área de San Lorenzo Toxico y San Jerónimo Ixtapantongo se encontró que no es una barrera hidráulica, ya que el flujo se canaliza por un medio poroso y permeable con base en la estratigrafía y además el flujo es controlado por porosidad secundaria debido a los sistemas de fallas y fracturas del sistema de fallas Toxico, y otras fallas con direcciones NW-SE y N-S.

ABSTRACT

In this work the geology for the Ixtlahuaca fault is exposed. The Ixtlahuaca fault is located in the State of Mexico and within the municipalities of Ixtlahuaca and Jiquipilco. The Ixtlahuaca fault is also a geological-structural boundary (E-W) between the Toluca Valley Aquifer and the Ixtlahuaca-Atzacomulco Valley Aquifer. Since there are few studies that have considered the influence of geological properties and structures as faults in the aquifers of the Valle de Toluca and Ixtlahuaca basins in part due to the lack of a detailed knowledge of the stratigraphic sequences and geological faults involved; Because that, the main objective was proposed in this work as the geologic mapping of the Ixtlahuaca fault and its associated structures all these in relation to surface and underground water resources about the fault and adjacent parts of this fault.

The methodologies applied to achieve the main objective included those related to documentary research, geological photointerpretation, geological cartography, field geology, stratigraphy, structural geology and structural analysis in relation to hydrogeology (surface currents and compilation of some groundwater wells).

This work defined the stratigraphy and geology of the Ixtlahuaca fault and its surroundings. The informal geological units were defined are volcanic, sedimentary and volcanosedimentary rocks that range in age from Oligocene to Quaternary; geological units located in footwall and hanging wall of the fault. In the area, several fault and fracture systems were defined, such as the Ixtlahuaca fault trace (E-W), the Toxico fault system with NE-SW orientation, NW-SE fault systems and the San Jerónimo fault (NW-SE).

The last part of this work consisted in elaborating a basic hydrogeological map of the Ixtlahuaca fault environment, analyzing the geometries of the drainage patterns of surface water currents and elaborating two geological sections transverse to the Ixtlahuaca fault. The results of the analysis of drainage patterns allowed us to find different domains of drainage patterns that are related to the systems of fractures and faults defined in this work. The integrative analysis of stratigraphy, structural

geology, hydrogeology and geological sections supported by groundwater wells, allowed us to find that the Ixtlahuaca fault is a hydraulic boundary for the most part along its E-W trace; However, in the area of San Lorenzo Toxico and San Jerónimo Ixtapantongo, it was found that the fault is not a hydraulic barrier, since the flow is channeled through a porous and permeable medium based on the results of stratigraphy and also the flow is controlled by secondary porosity due to the failure and fracture systems of the Toxico fault system, and other failures with NW-SE and N-S orientations.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Planteamiento y justificación del problema

La falla Ixtlahuaca es una estructura geológica que, por su longitud y su orientación transversal a la Cuenca de Toluca (E-W), es relevante en la evolución geológica del Valle de Toluca e Ixtlahuaca. Esta falla no se había estudiado a escala de la propia falla desde el punto de vista geológico y por lo tanto existía un desconocimiento de los tipos de rocas a los cuales afecta y que la conforman; así como un desconocimiento de sus características geológicas estructurales. La falta de esta información básica geológica no permite avanzar en estudios que busquen establecer relaciones e interpretaciones de esta falla con otros procesos naturales, por ejemplo, los recursos hídricos (superficiales y subterráneos) o riesgos geológicos. Desde el punto de vista hidrogeológico es relevante conocer la geología de la falla Ixtlahuaca ya que limita dos acuíferos de la Cuenca de Toluca, acuífero del Valle de Toluca (AVT) y el acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco (AIA). Existen trabajos en la literatura que mencionan a la falla Ixtlahuaca y son de carácter regional (Ortíz y Bocco, 1989; García-Palomo et al., 2008), pero ninguno profundiza a nivel de la falla.

1.2 Hipótesis

La Falla Ixtlahuaca divide dos acuíferos de la Cuenca alta del río Lerma, el acuífero del Valle de Toluca (AVT) (Clave 1501) y el de Ixtlahuaca-Atlacomulco (AIA) (Clave 1502). La geología estructural y actividad geológica de la falla y sus fracturas asociadas tanto en el bloque del alto como del bajo pueden influir en las condiciones hidrológicas de los recursos hídricos adyacentes a la falla, por esto parece ser que la falla está generando posibles controles estructurales tanto en las geometrías de

los cuerpos de agua subterránea cercanos a la falla como en las zonas de posible infiltración y controlando la dirección de los cauces de agua superficial.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar la geología de la falla Ixtlahuaca mediante la cartografía geológica de las unidades rocosas y estructuras asociadas, para realizar un primer acercamiento en la interpretación de algunas relaciones entre los recursos hídricos de la zona de estudio y la falla.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Elaborar un mapa geológico de la falla Ixtlahuaca mediante metodologías y técnicas inherentes a la fotogeología, geología de campo y geología estructural para establecer las características geológicas de la falla.
- 2) Establecer relaciones entre las redes de drenaje superficial y fracturas asociadas a la falla Ixtlahuaca a través del sistema de información geográfica ARCGIS para ver si existen controles estructurales.
- 3) Establecer relaciones geológicas e hidrogeológicas a niveles más profundos y transversales a la falla de Ixtlahuaca con base en la elaboración de algunas secciones geológicas y la integración de algunos registros de pozos en ambos lados de la falla.

1.4 Área de Estudio

La falla Ixtlahuaca se ubica al noroeste del Estado de México, en lo que corresponde a los municipios Ixtlahuaca y Jiquipilco. También se encuentra fisiográficamente al norte de la depresión de Toluca y al sur de la Cuenca del valle de Ixtlahuaca (CVI), y desde el punto de vista hidrogeológico limita dos acuíferos importantes para la

cuenca alta del río Lerma, por un lado, el acuífero del valle de Toluca (AVT) y por otro lado el acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco (AIA) (Figura 1.1 y anexo 4).

La falla Ixtlahuaca tiene aproximadamente 30 km de longitud por 6 km de ancho en su zona de influencia, y está constituida por una serie de estructuras lineales orientadas E-W, en planta es cóncava hacia el norte, en la misma dirección del buzamiento, la falla forma desniveles topográficos de hasta 100 metros, (Martínez–Reyes et al., 1990). García-Palomo et al. (2008) reconoce en la parte oriente de esta falla la presencia de facetas triangulares y bloques escalonados. El área de estudio está delimitada en un área rectangular con las siguientes coordenadas UTM (Datum: WGS 84):

Superior Izquierda x: 408,863.65 y: 2,166,165.82

Superior Derecha x: 439,064.80 y: 2,166,198.36

Inferior Izquierda x: 408,798.56 y: 2,156,011.98

Inferior Derecha x: 439,097.35 y: 2,156,044.53

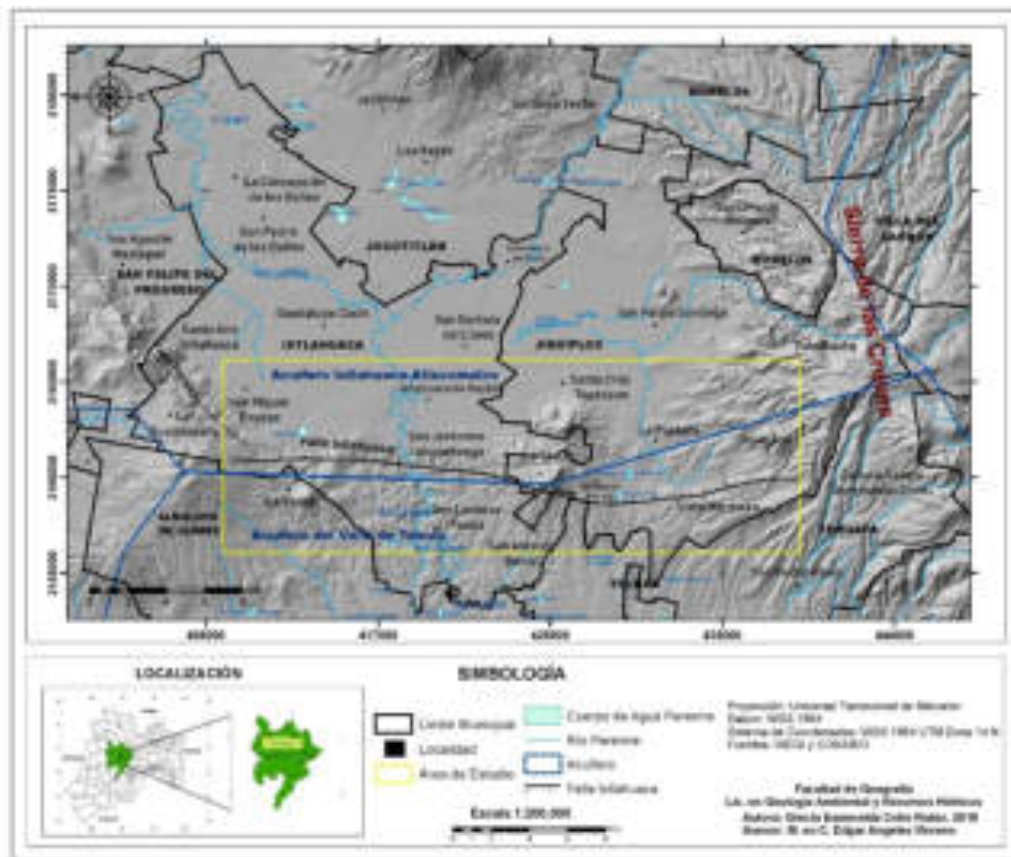


Figura 1.1 Mapa de localización de la zona de estudio.

CAPÍTULO 2

Metodología

En este trabajo de tesis para resolver el problema planteando y en consecuencia lograr los objetivos que se han declarado se emplearon las siguientes metodologías investigación documental, cartografía y fotointerpretación geológica, geología de campo, geología estructural, hidrogeología y el análisis de resultados. Estas metodologías comprenden algunas técnicas y materiales empleados que son inherentes a estas. En el esquema metodológico de la figura 2.1 se resumen las metodologías con actividades y materiales empleados en este trabajo.

2.1 Investigación documental

La investigación documental como metodología para indagar, recolectar, organizar, analizar e interpretar información (Díaz., 2012; Yuny y Urbano., 2014) partió de información relacionada con el problema y que comprendió la recopilación de varias fuentes documentales como bibliográficas, iconográficas y digitales. Las fuentes bibliográficas comprendieron libros de geología estructural, referencias de fotogeología, tesis y artículos científicos publicados del área de estudio. Las fuentes iconográficas fueron mapas topográficos de INEGI, geológicos como los de IFOMEGEM (1995) y del Servicio Geológico Mexicano (2002) y otros mapas publicados en artículos científicos. Los materiales adicionales que se emplearon fueron fichas bibliográficas, papel para toma de notas, y equipo de cómputo para desplegar mapas y ordenar la información recabada.

2.2 Cartografía y fotointerpretación geológica.

La fotogeología es parte de la fotointerpretación y es un método que consiste en la interpretación de los sucesos geológicos en la superficie terrestre a escala macroscópica a través de fotografías aéreas para reconocer estructuras y algunos

materiales (Gutiérrez, 2005). La fotogeología en un inicio solo empleaba fotografías aéreas, pero ahora tiene varias fuentes como son las imágenes de satélite (Guerra-Peña, 1980; 2003). El objetivo principal de la fotogeología fue la fotointerpretación geológica para después realizar la verificación puntual de campo.

Se realizó la fotointerpretación geológica con el empleo de mapas topográficos, ortofotos y las imágenes de satélite de Google Earth. En la parte topográfica se emplearon las cartas topográficas de Ixtlahuaca (E14A27) y Villa del Carbón (E14A28) a escala 1: 50 000 de INEGI. Las ortofotos que se usaron están a escala 1: 20 000 con claves E14A27E, E14A27F y E14A28D, las cuales fueron proporcionadas por INEGI. En las cartas topográficas impresas, con base en las curvas de nivel, se interpretaron geoformas, delimitaron posibles contactos litológicos en la superficie según los cambios muy pronunciados en las curvas de nivel y por último se trazaron posibles lineamientos que pudiesen ser zonas de fracturamientos. Las corrientes fluviales se emplearon para definir lineamientos de posibles fracturas con empleo de cartas topográficas y ortofotos. Las imágenes de satélite en Google Earth se emplearon también para fotointerpretar contactos geológicos y trazas de fracturas.

Los resultados de la fotointerpretación geológica se integraron en un solo mapa geológico de gabinete tomando como mapa base el mapa topográfico. Este mapa geológico de gabinete fue utilizado de guía y de partida para la verificación de las fotointerpretaciones, pero con geología de campo.

2.3 Geología de campo

La geología de campo es un campo metodológico valioso en la geología y consiste en metodologías y técnicas empleadas para resolver problemas geológicos (Compton, 1985). Algunas metodologías comprenden la toma de datos en afloramientos, clasificación de rocas en campo, cartografía de rocas en el campo, elaboración de secciones geológicas y armar reportes geológicos de campo. El levantamiento geológico empleado en este trabajo consistió en la verificación y

afinación del mapa geológico fotointerpretado en gabinete (verificación de lineamientos, contactos litológicos y relaciones estratigráficas), selección de estaciones en campo para análisis detallado geológico, muestreos (litológico y geológico-estructural), metodología de toma de datos en afloramiento y la ubicación de pozos de agua subterránea adyacentes al escarpe de la falla Ixtlahuaca. A continuación, se describen estas fases:

A) Verificación del mapa fotointerpretado en campo: El mapa geológico de gabinete fue mejorado en sus relaciones geológicas al visitar varias estaciones de observación en campo y en las cuales se definieron relaciones de contactos litológicos, verificación de lineamientos estructurales y tipos de materiales geológicos.

B) Selección de estaciones para análisis de campo detallado y puntos de muestreo: Las estaciones de campo fueron elegidas al establecer posibles explicaciones tentativas a las relaciones geológicas a partir del mapa fotointerpretado. Estas relaciones implicaban edades relativas en la posición estratigráfica de los cuerpos rocosos, y de fracturamientos que afectaban a determinadas rocas. El muestreo litológico comprendía la clasificación de la roca en campo para después analizar si la roca era representativa de un muestreo.

C) Metodología de toma de datos en afloramiento: La toma de datos geológicos en el afloramiento y plasmarlos en la libreta de campo se siguieron los pasos a continuación:

a) Levantamiento de diagramas descriptivos de las litologías y estructuras observadas, en estas se colocan las representaciones en dibujo de las litologías y el orden de estas.

b) Identificación de las litologías y algunos minerales presentes en el punto de muestreo.

c) Interpretación de las litologías y el orden en el que se encuentran, así como el análisis de su comportamiento en el que se reflejaban en los afloramientos.

d) Toma de datos estructurales de fracturamientos, fallas, estrías de fallas, líneas de flujo, estratificaciones y otras estructuras que se encontraron.

e) Toma de fotografías con escala y toma de muestras litológicas representativas.

f) Colocación de los rumbos y echados de las estructuras encontradas en los puntos de muestreo sobre el mapa de fotointerpretación geológica, esto se realizó con ayuda de la regleta escala 1: 500 y en algunos casos escalímetro y transportador.

Los materiales ocupados fueron los siguientes: mapa topográfico con fotogeología, libreta de tránsito, receptor tipo GPS marca Garmin, brújula Brunton y tipo Silva, escalímetro, transportador, regleta 1: 500, pica geológica, lápiz, colores y cámara fotográfica.

Las metodologías, técnicas y actividades descritas anteriormente permitieron obtener un mapa geológico completo de la falla Ixtlahuaca en donde se muestran las relaciones geológicas y estructuras de deformación. Este mapa fue fundamental para establecer las relaciones con los recursos hídricos en las zonas adyacentes y en la falla.

D) Ubicación de pozos de agua subterránea: En el transcurso del trabajo geológico de campo se ubicaron pozos de agua subterránea que se encontraban adyacentes a la falla Ixtlahuaca. Estos datos de los pozos en campo se emplearon en la siguiente etapa metodológica del análisis geológico-estructural y controles en la hidrogeología de la falla Ixtlahuaca.

2.4 Análisis geológico-estructural y sus controles en hidrogeología

El mapa geológico final de la falla Ixtlahuaca y el registro de datos estructurales se integraron para establecer relaciones geológicas en la zona. Algunas relaciones que se emplearon fueron las relaciones de corte entre fracturas y fallas geológicas, y litologías para establecer una secuencia de eventos de deformación.

Los controles en la hidrogeología se establecieron a partir de dos aspectos fundamentales: la relación de la geología y en especial las fracturas y fallas asociadas de la falla Ixtlahuaca con los patrones geométricos de las corrientes superficiales y las relaciones del registro litológico y de niveles estáticos de algunos pozos de agua subterránea con la geología estructural de la falla Ixtlahuaca.

Las corrientes superficiales se extrajeron de las cartas topográficas de INEGI y éstas se integraron con la capa de geología de la falla Ixtlahuaca y después con el mapa geológico-estructurales para establecer relaciones geométricas y posibles controles estructurales en los arroyos.

En el establecimiento de las relaciones de lineamientos con agua subterránea se realizaron elaborando secciones geológicas en donde se tenía información de pozos de agua subterránea. Las interpretaciones hidrogeológicas se realizaron integrando el registro de los fracturamientos y los registros litológicos de pozos que se ubican al norte y sur de la falla, a lo largo de secciones geológicas clave y transversales a la falla de Ixtlahuaca. Se analizó si existe o no relación hídrica con las fracturas de la falla Ixtlahuaca, y finalmente se generaron las conclusiones de la investigación.

Los materiales que se emplearon en el análisis fueron el papel necesario para elaborar secciones geológicas, escalímetro, transportador, regletas de escalas, lápices, colores y borradores. Otro material utilizado fue el software ARCGIS para integrar las capas de información generadas, y los softwares CorelDRAW e ILLUSTRATOR; con esto se realizó el análisis cartográfico necesario. El software STERONET se empleó para el análisis estructural y representación gráfica de fracturas que fueron encontradas.

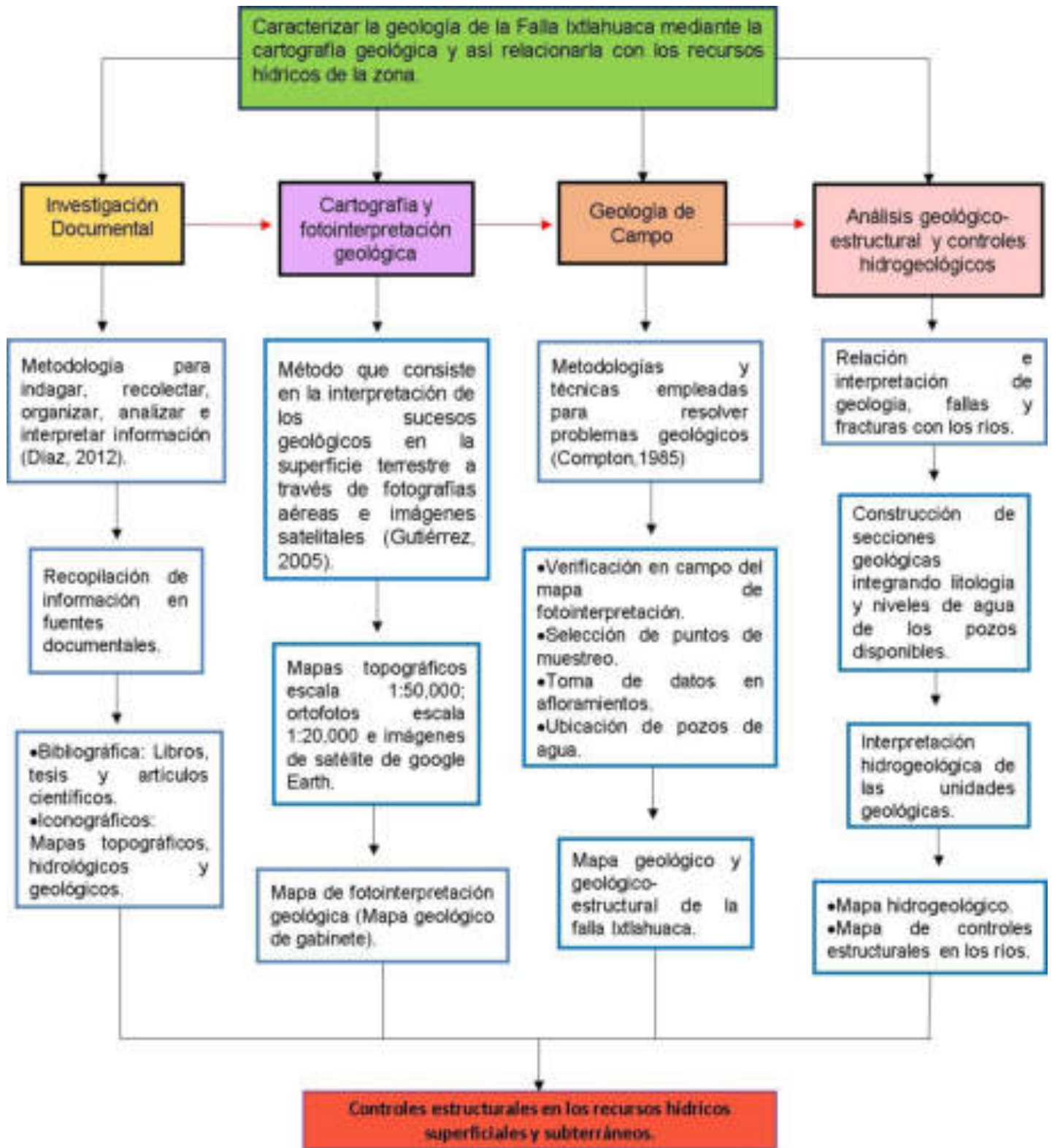


Figura 2.1 Esquema metodológico de este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 3

Marco Teórico

3.1 Parte central de la Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es considerado un arco volcánico continental del Cenozoico que cruza transversalmente a la República Mexicana y que ha tenido una gran actividad magmática desde su formación hasta la actualidad (Moran-Zenteno, 1984). Gómez-Tuena et al., (2005), separó a la FVTM en tres sectores geológicos y tectónicos (Figura 3.1), el primero abarca desde la costa del Golfo de California hasta la junta triple definida por los rifts de Zacoalco, Chapala y Colima; el segundo sector, sector central, va de la junta triple hasta el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez et al., 2002) y el último sector está definido entre este sistema de fallas y la costa del Golfo de México.

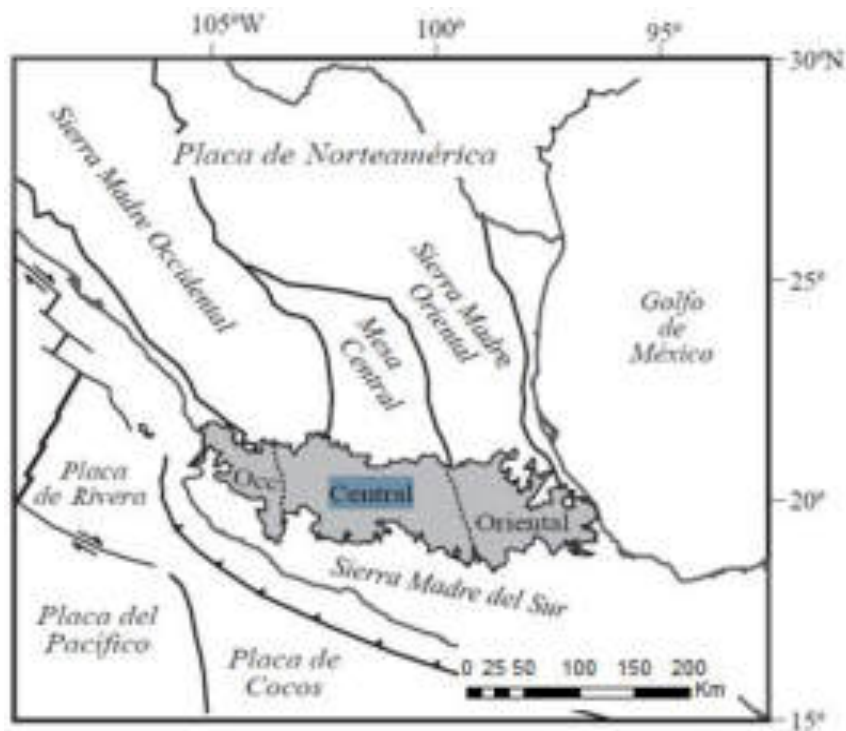


Figura 3.1 Ubicación Regional de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena et al., 2005).

La falla Ixtlahuaca se encuentra en la porción central de la FVTM y es transversal al sistema SFTSMA (García-Palomo et al., 2008); sin embargo, la historia de su fallamiento se desconoce y también sus relaciones con el vulcanismo a escala de la FVTM.

El sector central de la FVTM muestra varios pulsos de magmatismo que varía de composición andesítica a basáltica y que están ligados a pulsos de fallamiento desde el Mioceno al Plioceno (Alaniz-Álvarez et al., 2002; Gómez-Tuena et al., 2005).

3.2 Bloque Norte y Centro de la Sierra de las Cruces

La Sierra de Las Cruces (SC) se ubica en el límite del sector central y oriental de la FVTM, y limita en la dirección Este-Oeste a la Cuenca del Valle de México de la Cuenca del Valle de Toluca. La SC tiene una extensión de 110 km y un ancho que varía de 47 km a 27 km y sus rocas tienen edades que van del Mioceno al Pleistoceno (García-Palomo et al., 2008). García-Palomo et al. (2008) dividió a la SC en tres grandes bloques con base en argumentos geomorfo-estructurales: norte, centro y sur, delimitados por fallas de dirección E-W. La falla Ixtlahuaca adquiere un papel de importancia ya que divide al bloque norte del central en la SC (Figura 3.1).

En el bloque norte García-Palomo et al. (2008) definió dos sistemas de fallas con direcciones E-W y NE-SW con base en la expresión geométrica de patrones de drenaje de algunos ríos de la región, como: Los Sabios, San Jerónimo, La Ladera, San Pedro y La Bufo. La falla Ixtlahuaca parece atravesar a la SC y parece influir en los diversos fracturamientos de capas volcánicas dentro de esta sierra, que a su vez han dado origen a algunos cambios de dirección en los ríos tanto intermitentes como perennes esto lo dejó planteado García-Palomo et al. (2008) (Figura 3.2).

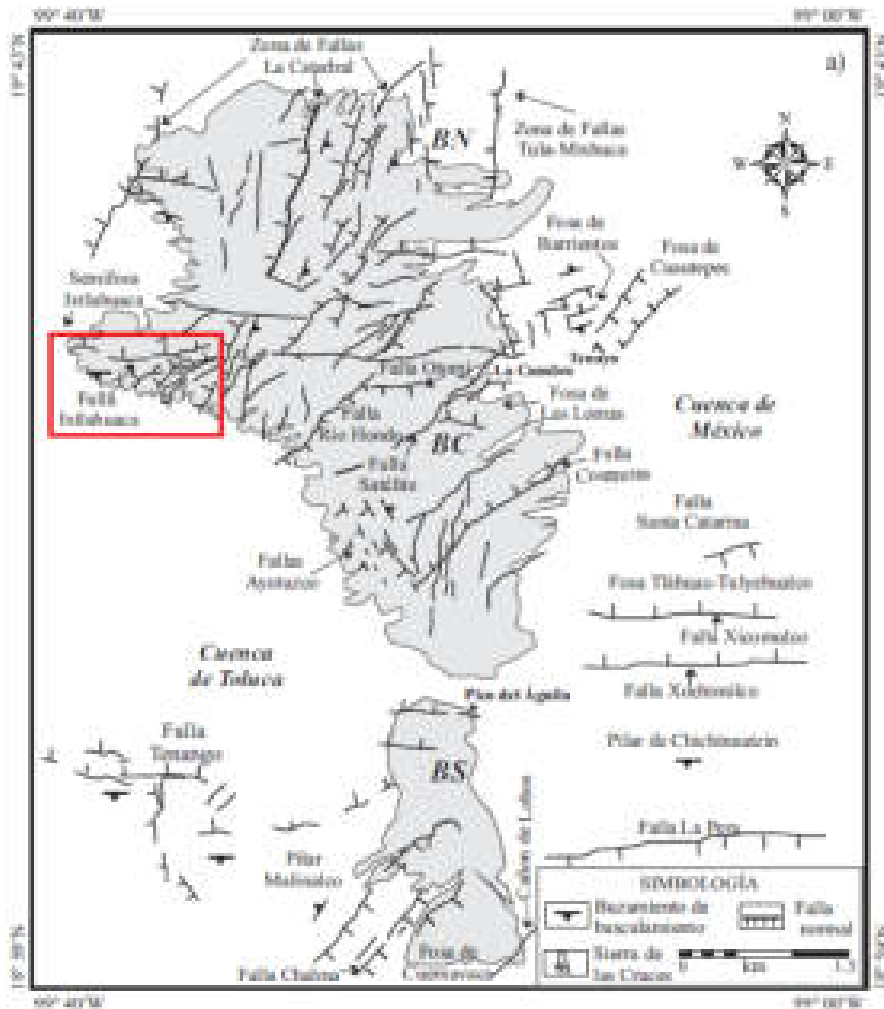


Figura 3.2 Ubicación de la falla Ixtlahuaca en el contexto geológico estructural de la Sierra de las Cruces (Modificado de García-Palomo et al., 2008).

3.3 Estratigrafía de la Cuenca del Valle de Ixtlahuaca

El conocimiento de la estratigrafía de la Cuenca del Valle de Ixtlahuaca (CVI) es muy limitada en general, el mapa geológico compilado por IFOMEGEM (1995) del Estado de México muestra que las rocas más antiguas son las de la Formación Xochitepec que afloran en la Sierra Mazahua y en el escarpe de la falla Perales; estas rocas presentan metamorfismo regional en facies de esquisto verde y comprenden metatobas, filitas pelíticas, esquistos verdes, calizas arcillosas y lavas de composición andesítico - basáltico con intercalaciones de lutita negra. De

acuerdo con IFOMEGEM (1995) estas rocas son seguidas de conglomerados, areniscas y limolitas del Paleógeno. Las rocas siguientes en tiempo son andesitas y dacitas del Mioceno, y luego rocas volcánicas (ignimbritas, andesitas y basaltos), epiclásticas y abanicos aluviales del Plioceno. A estas rocas le sobreyacen depósitos piroclásticos del volcán Jocotitlán (Salinas-Sánchez, 2013) y lacustres equivalentes a la Formación Ixtapantongo (Sánchez-Rubio, 1984). Las rocas siguientes en la columna estratigráfica serían rocas piroclásticas del volcán Jocotitlán y depósitos de lahares (Salinas-Sánchez, 2013) y por último depósitos fluviales y de abanicos aluviales dentro del valle.

3.4 Fallas en la Cuenca del Valle de Ixtlahuaca

La Cuenca del Valle de Ixtlahuaca (CVI) está limitada por las fallas Perales, Ixtlahuaca, Pastores y fallas de la SC. Estas fallas pertenecen a los sistemas de fallas E-W de la FVTM (Suter et al., 1992) y al sistema N-S y NW-SE del SFTSMA (Alaniz-Álvarez et al., 2002). La falla Perales limita en su parte poniente a la CVI mientras que la falla Ixtlahuaca es el límite sur.

En su parte oriente la cuenca del valle de Ixtlahuaca es en parte limitada por el sistema de fallas de la SC, como se mencionó en parte en el punto 2.2, este sistema de fallas presenta direcciones NE-SW, E-W y NW-SE (García-Palomo et al., 2008).

La falla Perales es interpretada que pertenece al SFTSMA que Alaniz-Álvarez et al. (2002) describe como un conjunto de estructuras transversal a la orientación E-W de la FVTM las cuales han tenido reactivaciones de tipo fallas normales en el Oligoceno y Mioceno, y que constituyen el límite entre bloques corticales con distintos espesores. La falla Ixtlahuaca, como límite sur de la CVI, presenta un rumbo E-W y que limita dominios estructurales en la Sierra de Las Cruces (SC) (García-Palomo et al., 2008), y es una falla que parece enlazar a la falla Perales con el sistema de fallas de SC. La falla Pastores es el límite norte de la CVI, presenta una dirección E-W pasando por Atlacomulco, corta al SFTSMA y en algunos

sectores se han detectado movimientos de fallas cercanas y paralelas al rumbo de la falla Pastores con relación a sismos (Sunye-Puchol et al., 2015).

Ortiz y Bocco (1989) realizan un análisis morfotectónico en el valle de Ixtlahuaca en el que describen los lineamientos estructurales e interpretan el tipo de desplazamiento de las fallas mayores; ellos presentan mapas de densidad de disección del relieve y morfoestructurales del área de estudio que abarcan los municipios de Ixtlahuaca, Zinacantepec, Atlacomulco, Toluca y Villa del Carbón. Su trabajo muestra que los lineamientos estructurales tienen direcciones NW-SE, E-W, NE-SW y N-S en la cuenca del valle de Ixtlahuaca y sus bordes. Ellos notaron que existe una relación estrecha entre los escurrimientos de aguas superficiales y los rasgos tectónicos de la zona.

3.5 Relaciones entre falla geológicas y acuíferos

Las fallas geológicas en ambientes hidrogeológicos pueden comportarse según Bense (2004), como un contacto de diferentes unidades hidroestratigráficas, incluso puede dividir a los acuíferos, además considera que la zona de falla beneficia en algunos casos en la transmisividad hidráulica del acuífero y puede tener un comportamiento de zonas de infiltración o zonas de descarga de los acuíferos.

La distribución espacial de las propiedades hidráulicas y las discontinuidades estructurales en los materiales geológicos influyen en gran medida sobre las trayectorias complejas que presenta el flujo de agua subterránea en un sistema acuífero (Carreón-Freyre et al., 2005). Algunos estudios muestran que las fallas y fracturas pueden actuar como fronteras hidráulicas para separar sistemas acuíferos en compartimentos diferentes, tanto a nivel regional como en cuencas sedimentarias bien diferenciadas (Carrillo-Rivera, 2000; Mayo y Kontz, 2000).

Singal y Gupta (1999), mencionan que la mayoría de las rocas poseen fracturas y otras discontinuidades que facilitan el almacenamiento y movimiento de fluidos a través de ellos. Algunos de los efectos de las fallas en las aguas subterráneas son los siguientes:

A) Las fallas tienen efectos tales como truncamiento, desplazamiento, repetición u omisión de capas. En este sentido la distribución y ocurrencia de acuíferos puede ser afectada por fallas ya que un acuífero puede ser desplazado/truncado/omitido localmente (Fig. 3.3a).

B) Una falla puede poner rocas impermeables contra un acuífero, esto afectaría el flujo y la distribución de agua subterránea. (Fig. 3.3b).

C) El truncamiento de un acuífero a causa de una falla puede dar inicio a (ex)filtración y a la formación de manantiales alineados a lo largo de la falla. (Fig. 3.3c).

D) Una falla puede causar un escarpe: la erosión intensa del bloque superior y seguido por deposición del pie de la montaña en el bloque inferior. Los depósitos en el pie de la montaña pueden servir como buenos acuíferos. (Fig. 3.3d).

E) Un acuífero se puede repetir en una perforación a causa de fallas. Luego puede ser expuesto nuevamente a la superficie para convertirse en zona de recarga. (Fig. 3.3e).

F) En diques verticales, venas etc (los cuales generalmente actúan como barreras para el flujo de agua subterránea) una falla puede causar aberturas en estas formaciones provocando la formación de canales a lo largo de la barrera. (Fig. 3.3f).

G) Una falla puede producir una cascada de agua subterránea. (Fig. 3.3g).

Las fallas crean zonas lineales de porosidad secundaria más alta, dichas zonas pueden actuar como canales preferidos por el flujo de agua subterránea causando recarga/descarga.

Una zona de falla, cuando hay silicificación, puede actuar como una barrera para el flujo de agua subterránea.

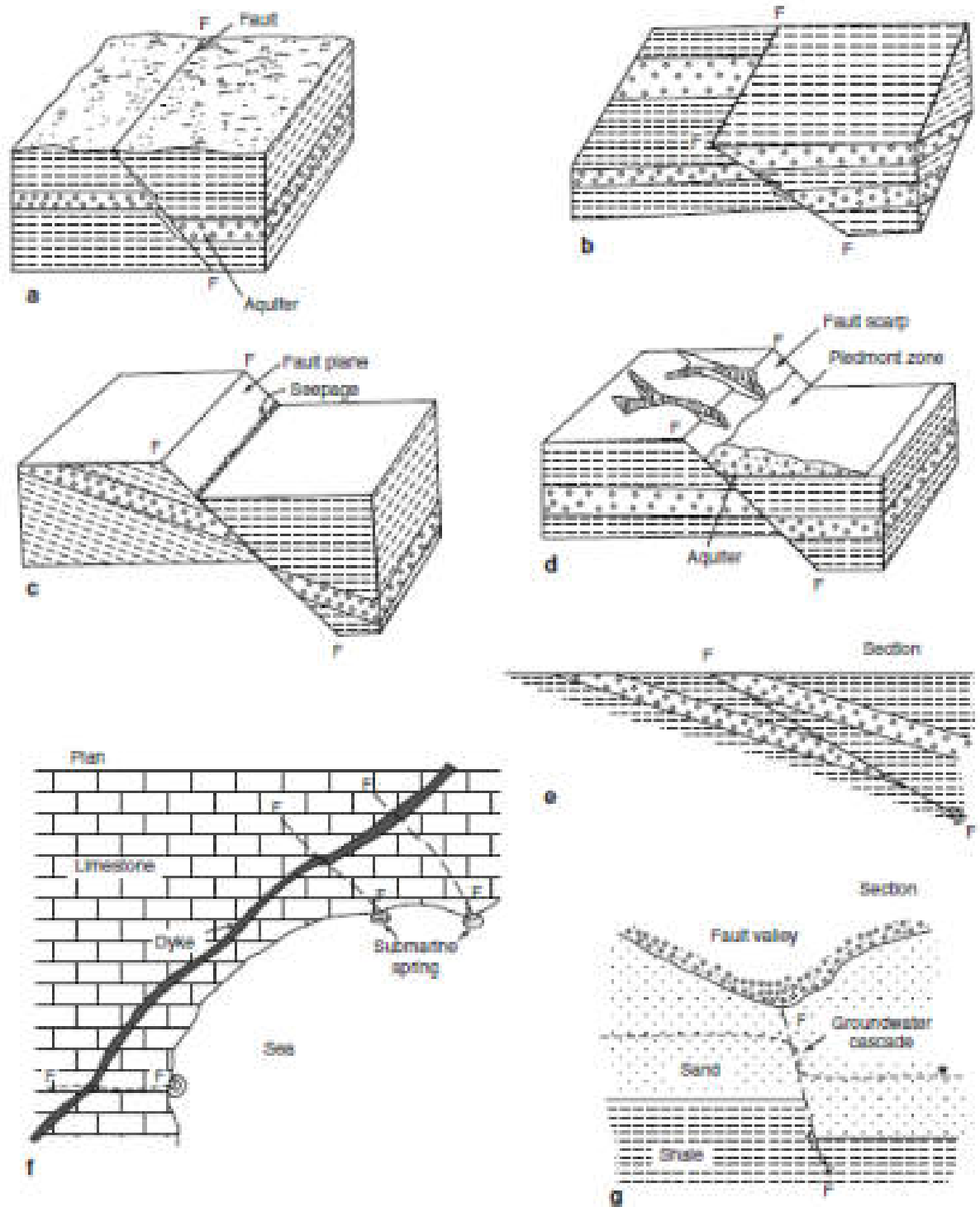


Figura 3.3 Efectos de las fallas en el agua subterránea (Singhal y Gupta, 1999).

3.6 Características hidrogeológicas de los acuíferos del Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco y Valle de Toluca

3.6.1 Acuífero del Valle de Toluca

El acuífero del Valle de Toluca está considerado como un acuífero multicapa (Expósito, 2012; CONAGUA, 2015), algunas características generales e hidrogeológicas se encuentran en la Tabla 3.1.

La estratigrafía del acuífero del Valle de Toluca (AVT), está basado en la descripción de DGCOH, 1989 en el documento de CONAGUA, “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle de Toluca (1501), Estado de México”, 2015. Las rocas más antiguas son andesitas del complejo volcánico de Xicontepec, que se encuentran poco fracturadas de edad del Oligoceno al Mioceno, le siguen derrames de lavas, brechas y tobas fracturadas de composición de andesítica y dacítica del Plioceno Inferior a Medio, le subyace la formación de las cruces que son rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y andesítica-basáltica de edad del Mioceno al Plioceno, seguido de la formación Tarango con flujos lava y piroclásticos del Plioceno Superior; del Plioceno Tardío al Pleistoceno se presentan flujos de lava, flujos piroclásticos y aglomerados de composición andesítica-basáltica, también los derrames de basalto y conos cineríticos en Santiago Tianguistenco, Xalatlaco y Tenango del Pleistoceno reciente, por último se encuentran depósitos lacustres y aluviones del Cuaternario.

Tabla 3.1 Información hidrogeológica del Acuífero del Valle de Toluca.

Clave del acuífero	Área (Km ²)	Límites del acuífero	Tipo de acuífero	Transmisividad (m ² /s)	Conductividad hidráulica (m/s)	Coefficiente de almacenamiento (%)	Déficit (Millones de metros cúbicos anuales)	Flujo de agua subterránea
1501	2738	Al Norte con el acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco, al Sur con el cerro de Tenango, al Sur Poniente con el Volcán Nevado de Toluca, al Sur-Oriente con el cerro la Corona y al Oriente con la Sierra de las Cruces y Monte Alto (CONAGUA, 2015).	Multicapa (Expósito, 2012). Se encuentran dos acuíferos, el superior de medio poroso que actúa como libre y que manifiesta recarga; el segundo como semiconfinado con fracturamiento.	0.83 x 10 ⁻³ m ² /s a 0.82 m ² /s (CONAGUA, 2015)	Entre 30 y 80 m/día (CCRECRL, 1993)	0.3 Y 0.9 (CCRECRL, 1993)	-136.726245	Se definieron los flujos subterráneos a partir de los niveles piezométricos regionales de 1970, del Nevado de Toluca hacia la ciudad de Toluca el flujo bifurca al Norte y Oriente, el flujo Oriente llega hasta Lerma de Villada donde desemboca el flujo bajo la laguna de Almoloya del Río; también otro flujo proveniente del Nevado de Toluca va al Norte en dirección a Ixtlahuaca, a la altura de las presas Ignacio Ramírez y Antonio Alzate (CONAGUA, 2015).

Fuentes: CONAGUA, 2015; CCRECRL, 1993 en CONAGUA, 2015.

3.6.2 Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco

El acuífero del Valle de Ixtlahuaca es considerado un acuífero semiconfinado (CONAGUA, 2015), las características que presenta en la Tabla 3.2 se muestran algunas de las propiedades generales e hidrogeológicas de este.

La descripción de la estratigrafía del acuífero Ixtlahuaca- Atlacomulco (AIA), se basa del documento de CONAGUA, “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixtlahuaca - Atlacomulco (1502), Estado de México”, 2015. Las rocas más antiguas del acuífero son rocas metamórficas de El Oro-Tlalpujahuá y el anticlinal Tzitzio-Huetamo del Jurásico Superior- Cretácico Inferior; le siguen las rocas volcánicas como lavas y depósitos piroclásticos en las laderas de los aparatos volcánicos del Oligoceno Superior; siguen las andesitas que forman las sierras altas, conos volcánicos de composición basáltica ubicados en Atlacomulco y San Felipe del Progreso de edad del Terciario y por último los depósitos lacustres del Cuaternario.

Tabla 3.2 Información hidrogeológica Acuífero del Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco.

Clave del acuífero	Área (Km ²)	Límites del acuífero	Tipo de acuífero	Transmisividad (m ² /s)	Coefficiente de almacenamiento	Déficit (Millones de metros cúbicos anuales)	Flujo de agua subterránea
1502	2894	Colinda al noreste con el acuífero Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, en el Estado de Michoacán, al noreste limita con el acuífero de Polotitlán, y al sureste con el acuífero del Valle de Mezquital, al suroeste limita con el acuífero Villa Victoria - Zacazonapan, y al sur limita con el acuífero del Valle de Toluca (CONAGUA, 2002 en Ramírez, 2015).	Semiconfinado	0.14 a 74.05 x 10 ⁻³	0.008	-5.806951	En general tiene dos direcciones, de sureste a noroeste y de sur a norte; el agua subterránea circula de las partes altas hacia el valle, es decir, de los alrededores de la presa Antonio Alzate y de San Pedro de los Baños hacia Atlacomulco (CONAGUA, 2015).

Fuentes: CONAGUA, 2015; Ramírez, 2015.

CAPÍTULO 4

Resultados: Estratigrafía

La geología de la falla Ixtlahuaca y su estratigrafía está representada en el mapa geológico, donde se puede ver su distribución de las unidades rocosas a lo largo de la falla a continuación, se describen cada una de las unidades (Fig. 4.1 y anexo 5).

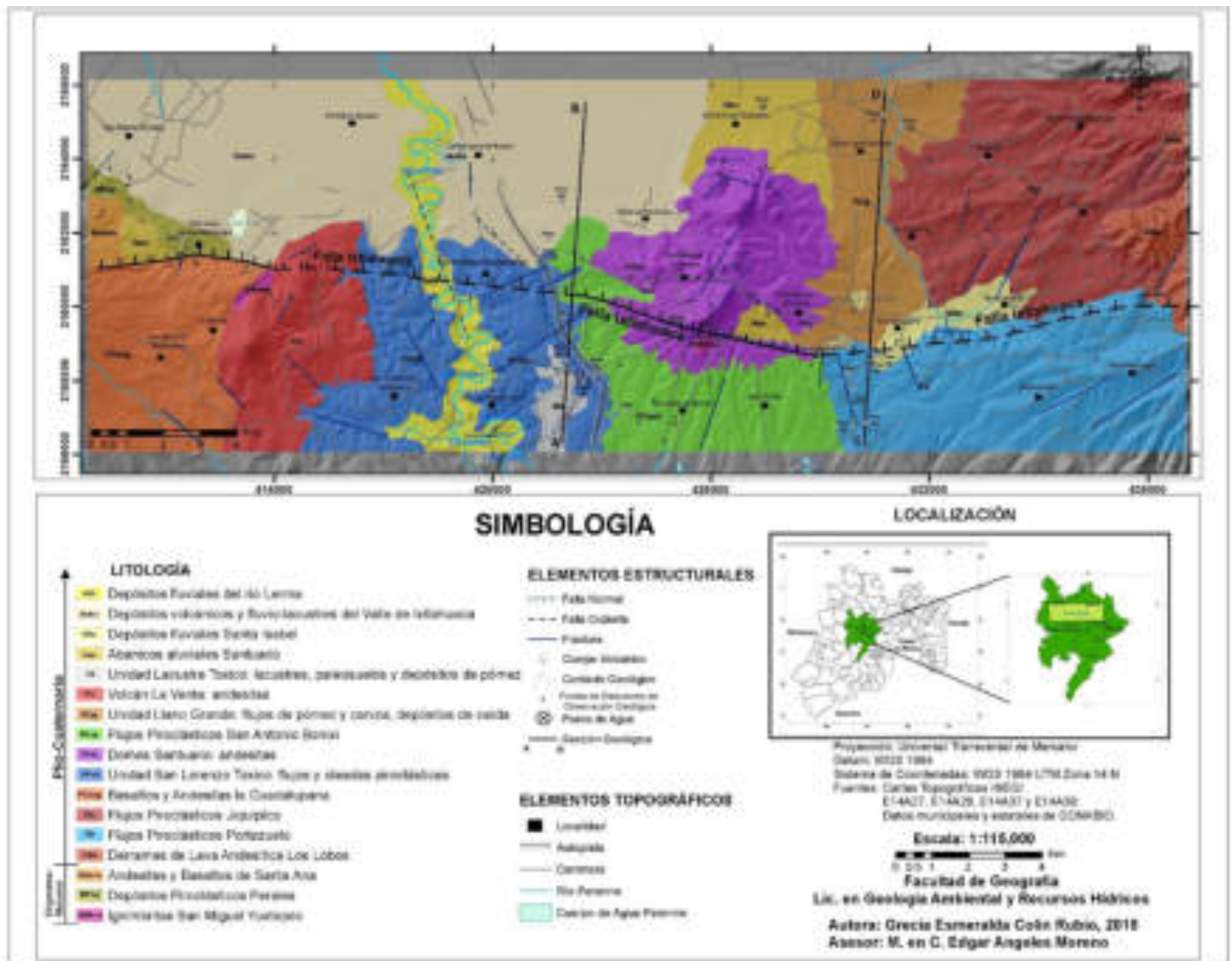


Figura 4.1 Mapa Geológico del área de estudio.

4.1 Ignimbritas San Miguel Yuxtepec

Las ignimbritas San Miguel Yuxtepec afloran en la comunidad del Ejido de San Miguel Yuxtepec y al Noroeste del Cerro la Venta.

Las ignimbritas en el Cerro La Venta se presentan en las cercanías de la falla Ixtlahuaca y en el bloque del bajo de esta falla (ver mapa geológico, figura 4.1 y anexo 5); estas ignimbritas se presentan en un río con un color pardo rosado, una textura piroclástica con pómez y fragmentos líticos volcánicos en una matriz de ceniza volcánica. La ignimbrita muestra una estructura soldada, masiva y compacta. La ignimbrita se presenta basculada y con fracturamientos orientados E-W, que pueden ser asociados a la falla Ixtlahuaca (Fig. 4.2).

La ignimbrita San Miguel Yuxtepec que aflora en el sur del Cerro El Águila y en el Ejido San Miguel Yuxtepec presenta un color rosa claro a rosa fuerte en afloramientos con una textura piroclástica, presenta fragmentos de roca volcánica dentro de una matriz de ceniza. Estas ignimbritas muestran estratificación vertical y presentan abundantes fracturas (Fig. 4.3).

La ignimbrita San Miguel Yuxtepec se encuentra cubierta por las rocas volcánicas del Volcán La Venta y por las rocas volcánicas de los Domos Santuario descritos más adelante. 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, descritos en el trabajo de DeJesús-García. (2018) y en parte en este trabajo más adelante. Esta ignimbrita se puede correlacionar en edad Mioceno-Plioceno con las ignimbritas América de 4 Ma y que se han denominado El Capulín (Mioceno-Plioceno) (Corona-Chávez et al., 2017) y también con rocas volcánicas de una caldera denominada Mazahua en la sierra Mazahua (Anguita et al., 1991) que se infiere pueda ser de edades de entre 5 y 4 Ma (Salinas-Sánchez, 2013).

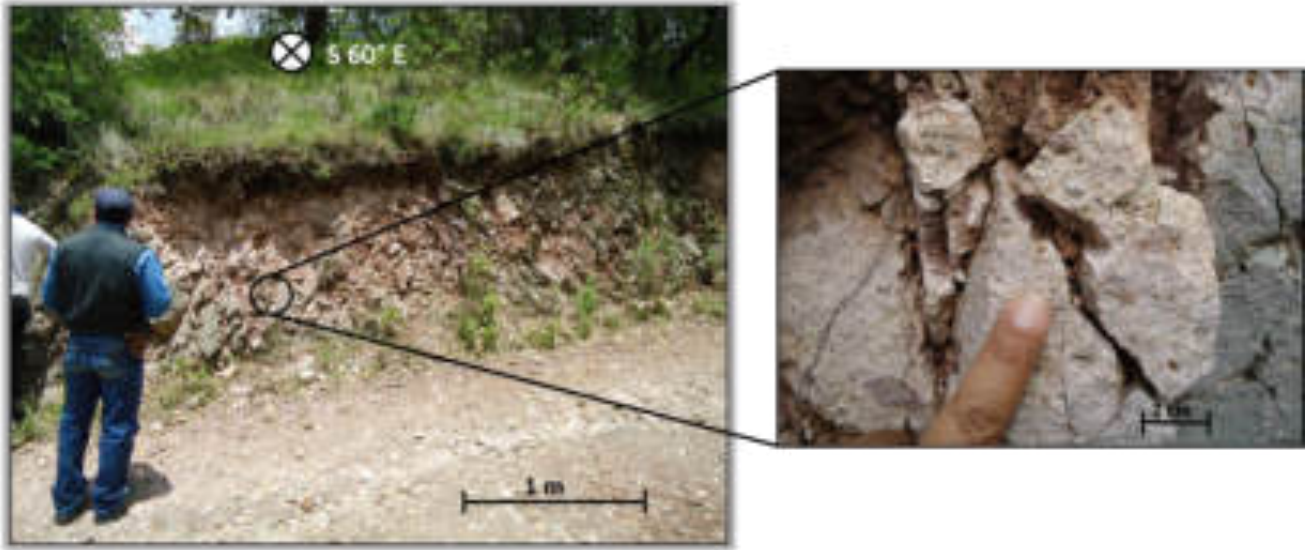


Figura 4.2 Ignimbrita San Miguel Yuxtepec aflorando en la parte sur de los Domos El Santuario; la ignimbrita presenta fracturada y afallada.



Figura 4.3 Ignimbrita San Miguel Yuxtepec aflorando a la base de un arroyo al NW de las laderas del Cerro la Venta. Esta ignimbrita se presenta basculada, fracturada y afallada. Las fracturas siguen un rumbo E-W.

4.2 Depósitos Piroclásticos Perales

Los depósitos piroclásticos Perales se localizan al pie del escarpe de la falla Perales y en el extremo poniente de la falla Ixtlahuaca. Estos depósitos son definidos y descritos en el trabajo de DeJesús-García. (2018) como una secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza y depósitos de caída de pómez.

Esta unidad es afectada por la falla Ixtlahuaca ya que se pierde su continuidad hacia el sur (ver mapa geológico de figura 4.1 y anexo 5) y se observan cubiertos por los derrames lávicos del volcán La Guadalupana. Estos depósitos debido a que están cubiertos por las andesitas y basaltos de Santa Ana se considera que pueden ser del Mioceno-Plioceno.

4.3 Andesitas y Basaltos de Santa Ana

Las andesitas y basaltos Santa afloran a lo largo del escarpe de la falla Perales y en el extremo poniente de la falla Ixtlahuaca. Esta unidad es descrita en el trabajo de DeJesús-García. (2018) como andesitas que presentan textura afanítica y en ocasiones porfídica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y en ocasiones olivino, y se presentan en estructuras de derrames masivos.

La edad considerada para estas andesitas y basaltos de Santa Ana es el Mioceno por DeJesús-García. (2018) 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., 2017).

Las andesitas Santa Ana se pueden correlacionar por litología, posición estratigráfica y edad con basaltos y andesitas de la Sierra de Angangueo que fueron fechados en el Mioceno (Hernández-Bernal et al., 2016). A lo largo de la falla Ixtlahuaca estas rocas son cortadas por esta falla en su extremo poniente, en la intersección con la falla Perales (ver mapa geológico de figura 4.1 y anexo 5). Estas rocas se pueden correlacionar con litologías resultado del vulcanismo del Mioceno en las raíces de la Sierra de Las Cruces (García-Palomo et al., 2008).

4.4 Complejo Volcánico Sierra de las Cruces

El complejo volcánico Sierra de las Cruces está ubicado entre la Cuenca del valle de México y la Cuenca del Valle de Toluca y se localiza al poniente del área de estudio de este trabajo. De acuerdo con García-Palomo et al. (2008) está conformada por ocho estratovolcanes y se caracteriza por la emisión de derrames de lava, extrusión de domos, emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de detritos y lodo, así como depósitos de avalanchas de escombros; su actividad principal volcánica ocurrió en el Plioceno tardío-Pleistoceno (García-Palomo et al., 2008).

En el extremo este de la zona de estudio, en Jiquipilco y siguiendo la traza de la falla Ixtlahuaca se identificaron varias unidades volcánicas definidas en este trabajo como flujos piroclásticos Jiquipilco, flujos piroclásticos Portezuelo, y derrames de lava Los Lobos.

4.4.1 Flujos piroclásticos Jiquipilco

La unidad de flujos piroclásticos Jiquipilco aflora en los alrededores y parte norte de la población de Jiquipilco (Ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 5). Esta unidad comprende flujos piroclásticos de bloques y ceniza, flujos piroclásticos de pómez y ceniza, oleadas piroclásticas y algunos lahares.

Los flujos piroclásticos de bloques y ceniza presentan en su mayoría de bloques angulosos a subangulosos de roca andesítica inmersos en una matriz de ceniza y líticos volcánicos andesíticos más pequeños en granulometría. Las andesitas de los bloques presentan una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y hornblenda (Fig. 4.4).



Figura 4.4 Flujo piroclástico de bloques y ceniza de composición andesítica. Estructura masiva y mal clasificado. Este depósito sobreyace un flujo de pómez y ceniza que se puede ver en el estrato 1 de 40 cm de espesor. En la capa superior en el afloramiento (estrato 2), se observa un flujo piroclástico de clastos de andesita de mayor tamaño y presencia de ceniza.

Los flujos piroclásticos de pómez y ceniza presentan una morfología de lomeríos alargados E-W limitados por arroyos, y se ubican hacia la parte baja en el bloque del bajo de la falla Ixtlahuaca, entre Jiquipilco y los domos Santuario (ver mapa geológico de figura 4.1 y anexo 5). Estos depósitos presentan una estructura masiva, laminada y estratificada en ocasiones. Las capas en estos flujos corresponden con oleadas piroclásticas y capas de depósitos de caída de ceniza (Fig. 4.5).

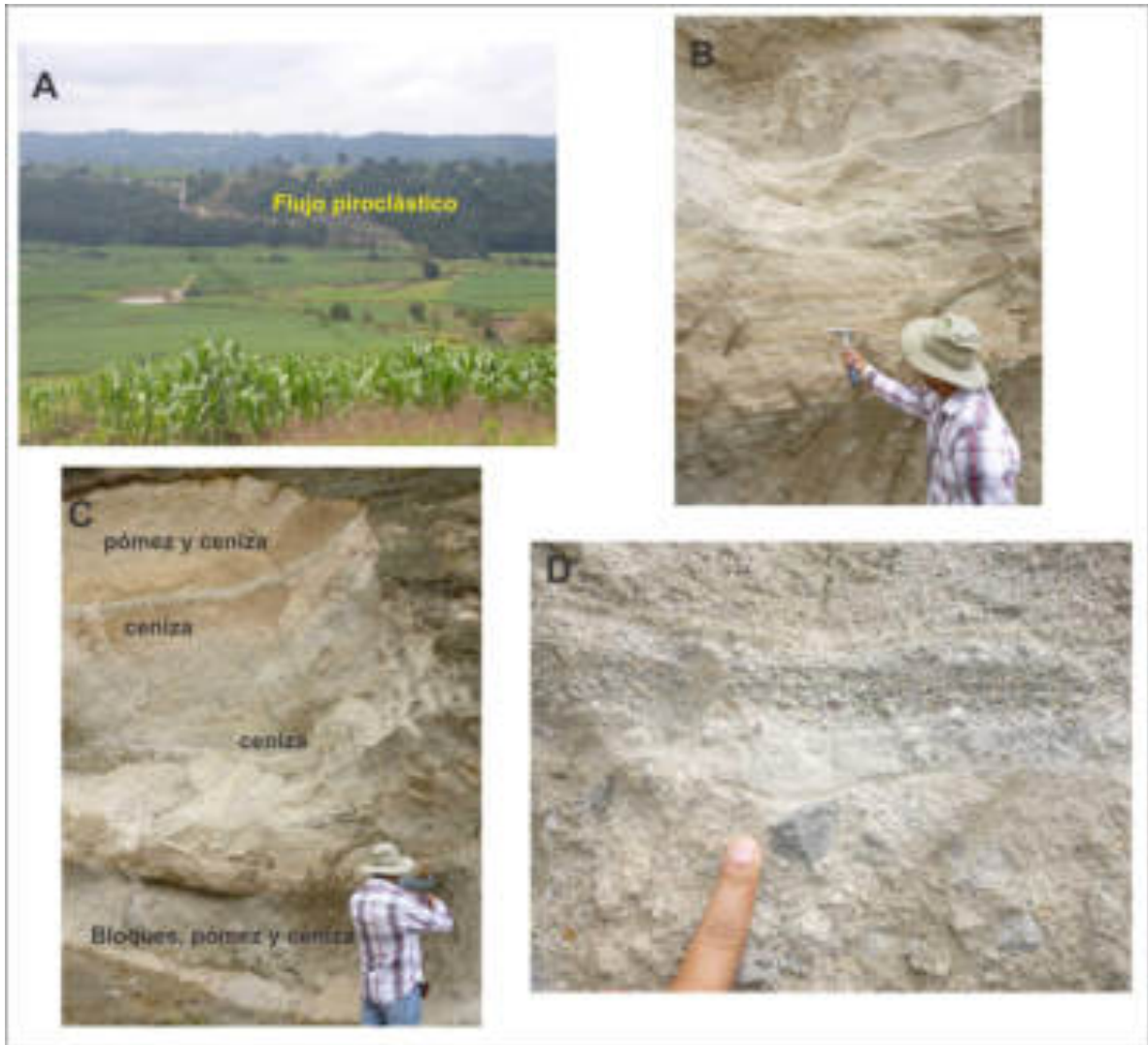


Figura 4.5 Flujo piroclástico de pómez y ceniza ubicado entre los domos Santuario y Jiquipilco. A, expresión geomorfológica en lomas alargadas E-W del flujo piroclástico; B, depósitos de ceniza de caída y oleadas piroclásticas intercaladas con el flujo de pómez y ceniza; C, estratificación de depósitos de caída con flujos de bloques, pómez y ceniza y pómez y ceniza; D, depósitos andesíticos de bloques, pómez y ceniza.

En la localidad de Las Golondrinas ubicada a 2 km de la entrada a Jiquipilco se identificó un depósito Lahar que presenta una estructura masiva y abundantes clastos volcánicos. Los clastos son de andesita de varios colores que se presentan de redondeados a subredondeados (Fig. 4.6). Los clastos de andesita presentan texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda en una matriz vítrea de color gris claro a gris oscuro. En algunas partes del Lahar se observa una matriz de tamaño arena y limo.

La edad de los flujos piroclásticos Jiquipilco se considera cercana a los 3.7 Ma con base en que se encuentran en asociación temporal cercana con los derrames de lava andesítica Los Lobos (descritos adelante) y que presencian extensiones y expresiones geomorfológicas que sugieren que la fuente fue el estratovolcán La Catedral en la parte alta de la Sierra Las Cruces.



Figura 4.6 Este afloramiento presenta un depósito de lahar, con clastos de andesitas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda. Los clastos encuentran redondeados y subangulosos, presentado intercalaciones de ceniza volcánica.

4.4.2 Flujos piroclásticos Portezuelo

Los flujos piroclásticos Portezuelo se ubican a 2 km al sur de la población de Jiquipilco en las comunidades de Portezuelo y Loma Endotzi. Estos flujos piroclásticos son de tipo de bloques y ceniza, estratificados con flujos de pómez y ceniza. Los clastos en los flujos son andesitas con textura porfídica y afanítica. La estructura de los flujos es masiva y con espesores de más de 20 m. En algunos afloramientos se identificaron chimeneas de elutriación (desgasificación), lo cual indica la presencia de evaporación agua al momento del enfriamiento y la formación del flujo piroclástico (Fig. 4.7).

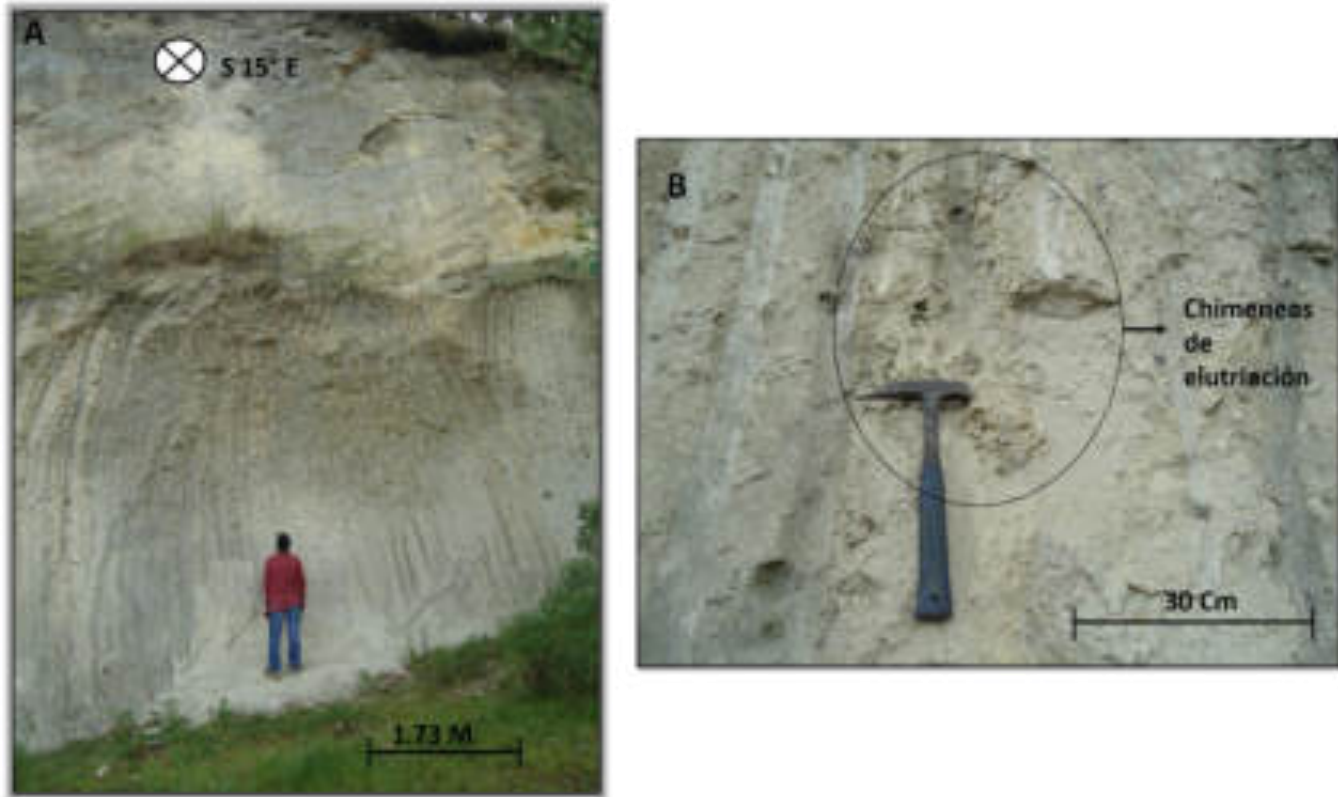


Figura 4.7 En relación con la imagen A se presenta un flujo piroclástico de ceniza, pómez y clastos de andesitas y además se observaron chimeneas de elutriación (desgasificación) como se muestra en la imagen B, representando el proceso de enfriamiento del flujo.

La edad de los flujos piroclásticos Portezuelo es ca. 3.7 Ma ya que parece que fue originado en el estratovolcán La Catedral y/o del centro de emisión en el Cerro Los Lobos. Esta unidad sería casi contemporánea con los flujos piroclásticos de Jiquipilco y los derrames de lava andesítica Los Lobos, descritos enseguida.

4.4.3 Derrames de Lava Andesítica Los Lobos

Los derrames de lava andesíticos Los Lobos se localizan a 3 km al noreste de Jiquipilco al pie del Cerro Los Lobos (fuera del área de estudio) y a lo largo de la carretera Jiquipilco-Santa Ana Jilotzingo. Los derrames de lava son de composición andesítica y presentan una estructura fluidal con intercalaciones de flujos de autobrechas andesíticas. La andesita de los derrames presenta una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y hornblenda en una matriz vítrea. Las

unidades de flujo de la lava presentan ondulaciones y pliegues de flujo (Fig. 4.8). Los derrames de lava Los Lobos parecen provenir de un centro de emisión que se ubicó en el cerro Los Lobos que se encuentra a 2 km al noroeste del cerro La Catedral en la Sierra de Las cruces.

Los derrames de lava Los Lobos se consideran asociados con el vulcanismo que originó a los flujos piroclásticos de Jiquipilco ya que las unidades parecen interdirigirse en la zona de Jiquipilco. La edad de los derrames lávicos se considera ca. entre 2.2 y 3.7 Ma ya que parece ser parte del estratovolcán La Catedral que ha sido fechado con entre ca. 2.2 Ma (edad Ar-Ar) (Aguirre-Díaz, et al., 2006) y 3.71 ± 0.4 Ma (Osete et al., 2000).

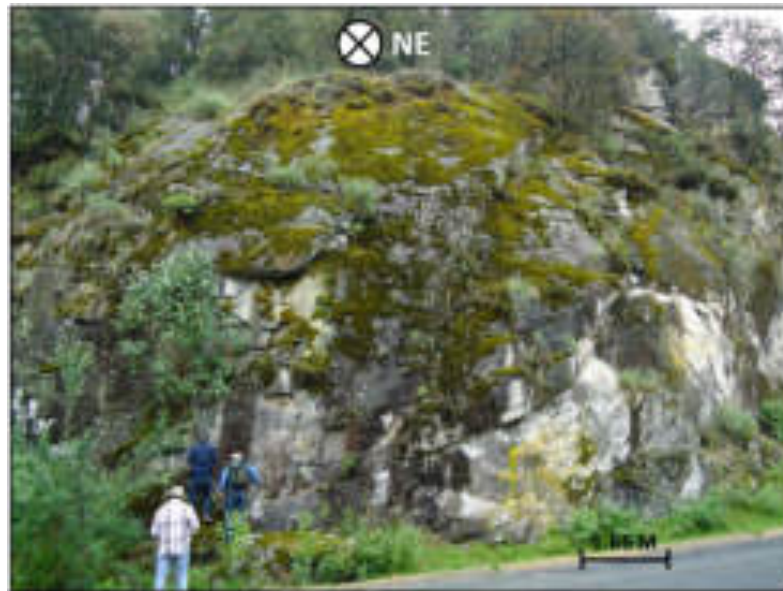


Figura 4.8 La fotografía superior muestra derrames lávicos y autobrechas de composición andesítica con una textura porfídica. Las andesitas presentan cristales de hornblenda oxidada.

4.5 Basaltos y Andesitas 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. El volcán La Guadalupana es considerado como un estratovolcán de composición basáltico-andesítico. En las laderas de su parte Este se observó la presencia de coladas de lava basáltico-andesítica algunas de estas fracturadas (Fig. 4.9). En algunos afloramientos se presentaban secuencias de depósitos de caída de ceniza y pómez (Fig. 4.10), así como de bloques semiangulosos basáltico-andesíticos.

Las rocas en las coladas de lava son andesitas basálticas con presencia de olivino. En algunos de los flujos piroclásticos andesíticos se observaron cristales de hornblenda, plagioclasa y biotita.

La edad que se considera para el volcán La Guadalupana es Plio-Cuaternario y puede que su edad mínima sea menor 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 4.9 Derrame de lava andesítico-basáltica del volcán La Guadalupana.

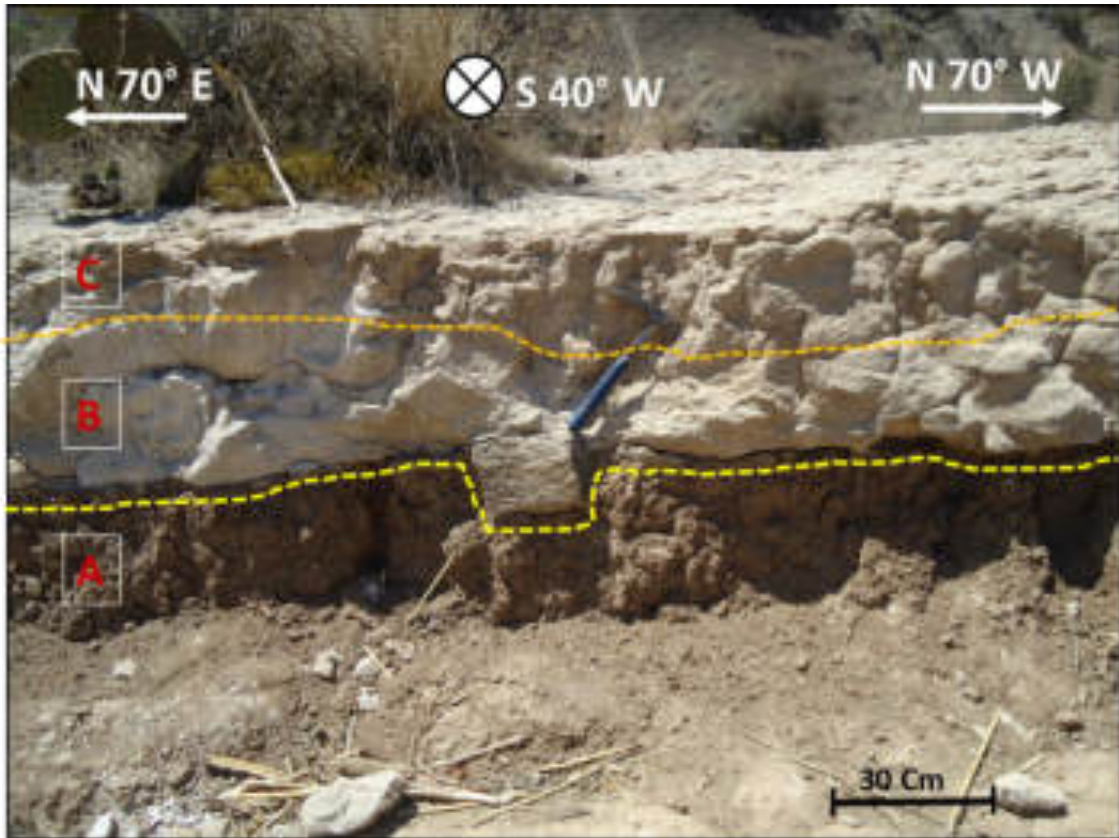


Figura 4.10 Depósitos piroclásticos andesíticos en las faldas del volcán La Guadalupeana. En la capa A se presenta un paleosuelo que es sobreyacido por un depósito piroclástico con pómez y ceniza (B) y posteriormente se tiene un depósito de caída de ceniza (C) que presenta fragmentos de plagioclasas y vidrio volcánico.

4.6 Unidad San Lorenzo Toxico

La unidad San Lorenzo Toxico aflora en el bloque del bajo de la falla Ixtlahuaca y su extensión abarca desde las poblaciones San Lorenzo Toxico y San Jerónimo Ixtapantongo (ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 5) hasta Mayorazgo de León (fuera del área de estudio). En trabajos antecedentes esta unidad fue cartografiada como parte de la Formación Ixtapantongo abarcando desde el Valle Ixtlahuaca hasta el graben de Acambay (Sánchez-Rubio, 1984) y también fue cartografiada siguiendo el curso del río Lerma (cartografía geológico-minera del SGM, 2002 y mapa geológico IFOMEGEM, 1995).

En este trabajo se decide separar a la unidad Toxico de la Formación Ixtapantongo con base en los resultados obtenidos.

La unidad Toxico es una secuencia de flujos y depósitos piroclásticos que comprenden flujos piroclásticos de pómez y ceniza, oleadas piroclásticas con pómez y ceniza, depósitos de caída de pómez y ceniza, y depósitos lacustres con paleosuelos en bloques, deformados y en forma de clastos incorporados a los flujos y oleadas piroclásticas (Fig. 4.11).

Los flujos piroclásticos de pómez y ceniza presentan estratificación masiva con espesores de estratos que varían de 4 m a 10 m, y están compuestos de piedra pómez de color crema a blanco de composición andesítica-dacítica, líticos de roca volcánica andesítica y ácida, y ceniza volcánica de color blanca y gris claro. Estos flujos están acompañados de capas de oleadas piroclásticas a la base y en la parte superior y algunas intercalaciones de depósitos de caída de ceniza volcánica.

Las oleadas piroclásticas de pómez y ceniza presentan estructura tabular con pómez blanca andesítica-dacítica bien redondeadas y líticos de andesita-dacita porfídica. Las oleadas se presentan con estructuras laminadas y capas paralelas, es común también observar laminación cruzada con contactos muy rectos y precisos. Las oleadas piroclásticas aparecen estratificadas con depósitos de caída de ceniza, y a veces con depósitos de pómez y ceniza. Se observan capas de

depósitos lacustres con superficies irregulares quemadas en contacto con oleadas piroclásticas; también aparecen bloques rotados y plegados de depósitos lacustres con fallas intraformacionales. En las cercanías de San Lorenzo Toxico también se observaron paleosuelos estratificados con depósitos lacustres pero que se presentan plegados. Existen dentro de las oleadas piroclásticas bloques de antiguos depósitos piroclásticos.

Las observaciones geológicas anteriores sugieren que la unidad San Lorenzo Toxico representaría flujos y oleadas piroclásticas que probablemente interactuaron con antiguos depósitos fluvio-lacustres y paleosuelos, esto es que los flujos piroclásticos entraron a cuencas lacustres.

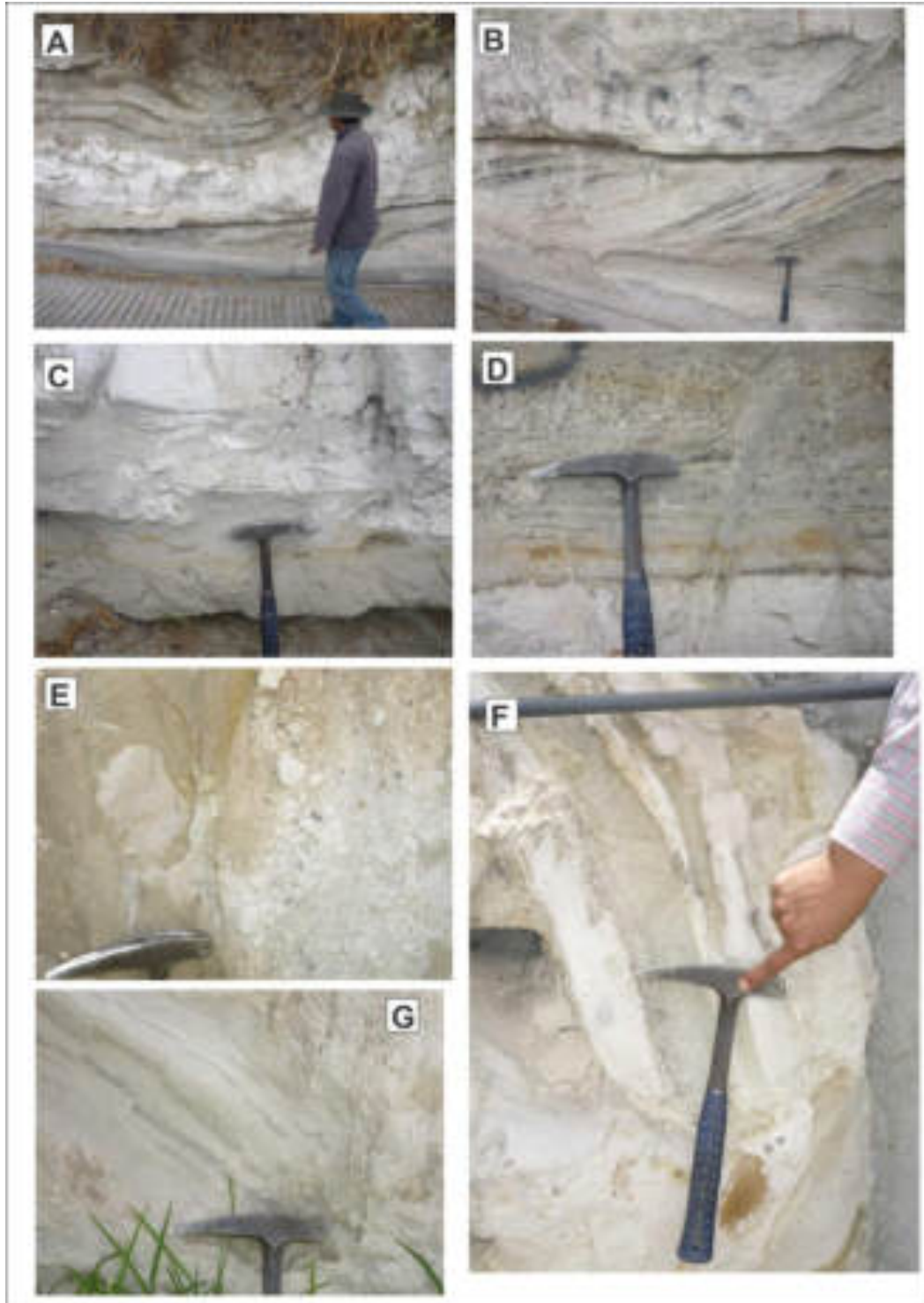


Figura 4.11 Unidad San Lorenzo Toxico. A, secuencia de oleadas piroclásticas con bloques de lacustres, se observan superficies quemadas en los depósitos lacustres; B, laminaciones cruzadas en oleadas piroclásticas de pómez y ceniza; C, flujo de pómez y ceniza con intraclastos lacustres y ceniza volcánica; D, laminaciones cruzadas y paralelas de oleada piroclástica; E, flujo piroclástico pómez y ceniza con bloques de andesita, dacita y antiguas rocas piroclásticas; F, capas de lacustres y cenizas re TRABAJADAS inmersas en flujo piroclástico; G, bloque de lacustres y cenizas volcánicas dentro de flujo piroclástico de pómez y ceniza.

En la figura 4.12 se observa un flujo piroclástico de pómez y ceniza con oleadas piroclásticas y depósitos de ceniza hacia la base y la cima del flujo. El contacto basal se observa irregular mientras que el contacto superior se presenta rectilíneo.

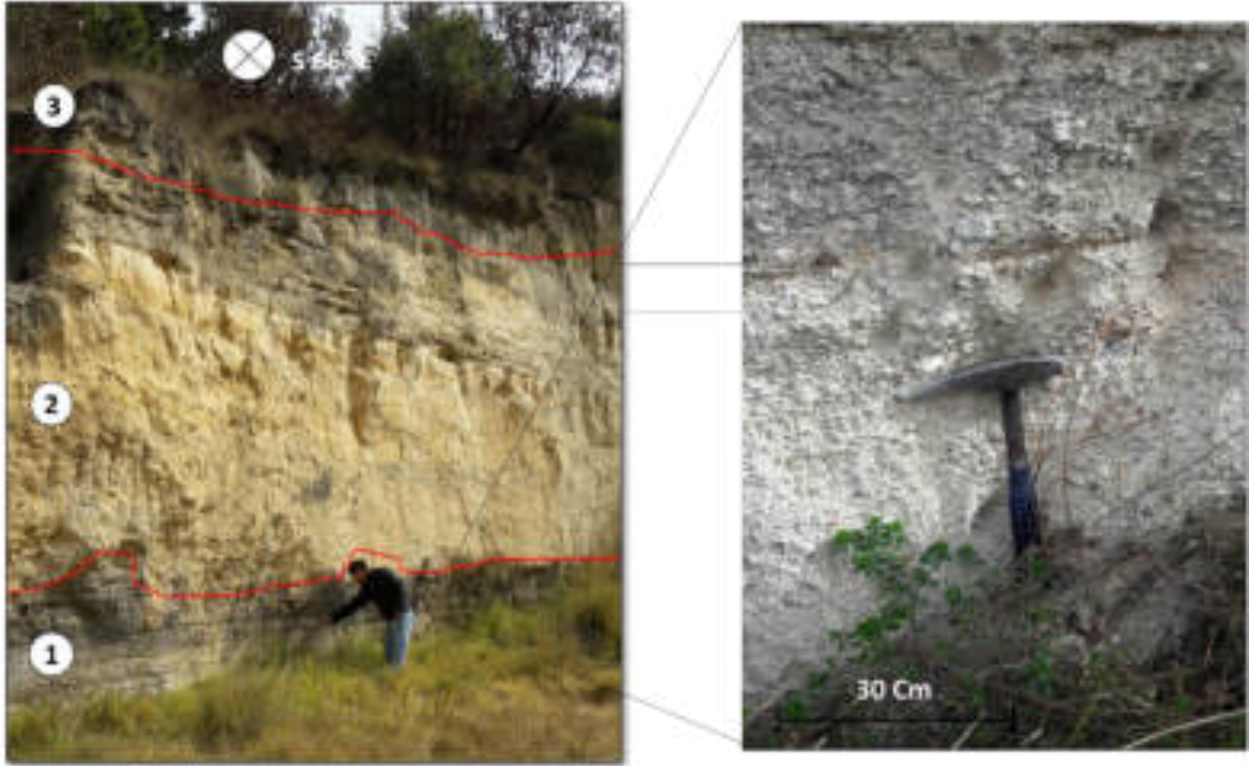


Figura 4.12 Secuencia de flujos piroclásticos, en la capa 1 se encuentra un flujo piroclástico de pómez y ceniza, donde en la segunda imagen se observa el flujo de manera detallada, en la capa 2 se presenta un flujo de mayor espesor de pómez y ceniza con presencia de oleadas piroclásticas, por último, la capa 3 son depósitos de ceniza.

La unidad San Lorenzo Toxico se encuentra subyaciendo a las lavas volcánicas del volcán La Venta y a los depósitos lacustres no deformados de la unidad lacustre Toxico, ambos descritos más adelante. La unidad San Lorenzo Toxico sobreyace a la falla Ixtlahuaca. Debido a que sobreyace a la falla Ixtlahuaca y la falla Ixtlahuaca cortó a rocas volcánicas de la Sierra de Las Cruces de ca. 3.7 Ma se considera una edad de esta unidad de Plioceno-Pleistoceno.

4.7 Domos Santuario

Los domos Santuario toman el nombre del Cerro Santuario ubicado a 7 km al Este de la población de Ixtlahuaca, anteriormente fueron nombrados domos Ixtlahuaca por Salinas-Sánchez (2013). Los domos Santuario (domos Ixtlahuaca) Salinas-Sánchez (2013) los describe como rocas volcánicas intermedias (andesita-dacita) con texturas hipocristalinas con una matriz granular rosácea y gris claro, con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita.

En este trabajo se describen a los domos Santuario como un grupo de tres domos de composición andesítica. El primero el Cerro Santuario, segundo San Miguel y el tercero cerro El Águila. Los tres domos presentan rocas andesíticas descritas en afloramientos y que muestran una textura porfídica con fenocristales de hornblenda, plagioclasa y biotita (Figs. 4.13 y 4.14). En varios afloramientos las andesitas se presentan intemperizadas (Fig. 4.15) y afalldas (Fig.4.16).

En la parte sur del domo cerro El Águila (San Miguel Yuxtepec) se observaron flujos piroclásticos de tipo bloques y ceniza de la misma composición que las rocas del domo.

En este trabajo, se correlaciona a los Domos Santuario con los Domos San Felipe (ubicados al noreste y fuera de la zona de estudio) en los cuales Salinas-Sánchez (2013) cita una edad de 3 Ma para los Domos San Felipe (edad no publicada por Claus Siebe en Salinas-Sánchez, 2013). Esta edad de finales del Plioceno y principios del Pleistoceno para estos domos Santuario es congruente con las relaciones con los basaltos-andesitas del volcán La Guadalupana y el Complejo Volcánico de la Sierra de las Cruces.



Figura 4.13 Se pueden observar los afloramientos de andesitas en el norte de los Domos Santuario, cerca de Santa Cruz Tepexpan.

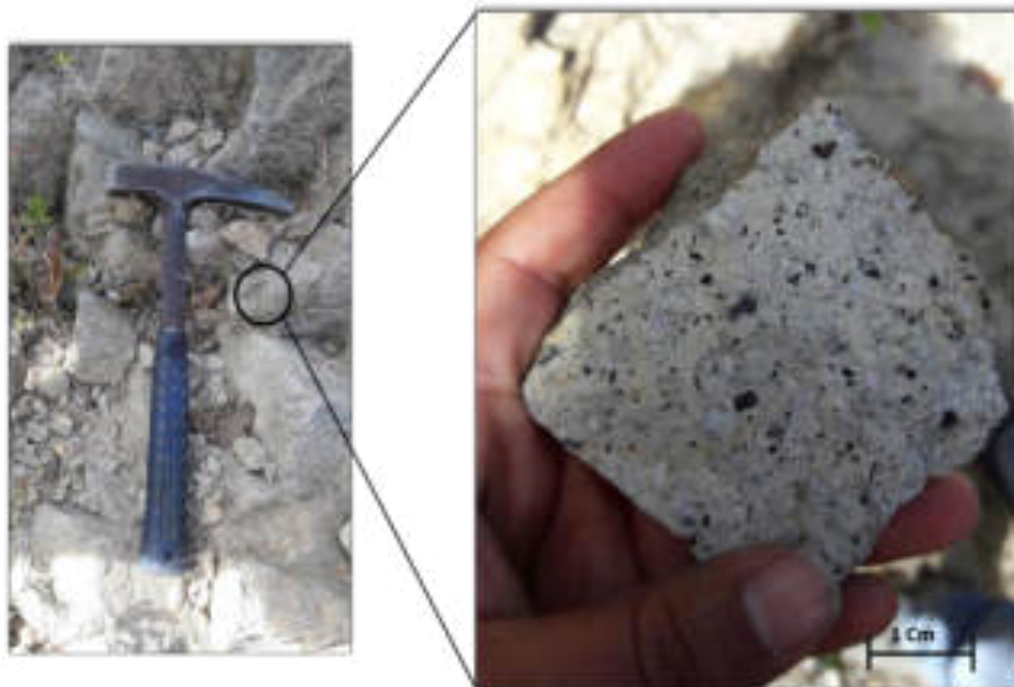


Figura 4.14 Afloramiento de andesita con cristales de plagioclasa, hornblenda y biotita. Este afloramiento está ubicado entre los domos San Miguel y El Águila en las cercanías de San Miguel Yuxtepec.

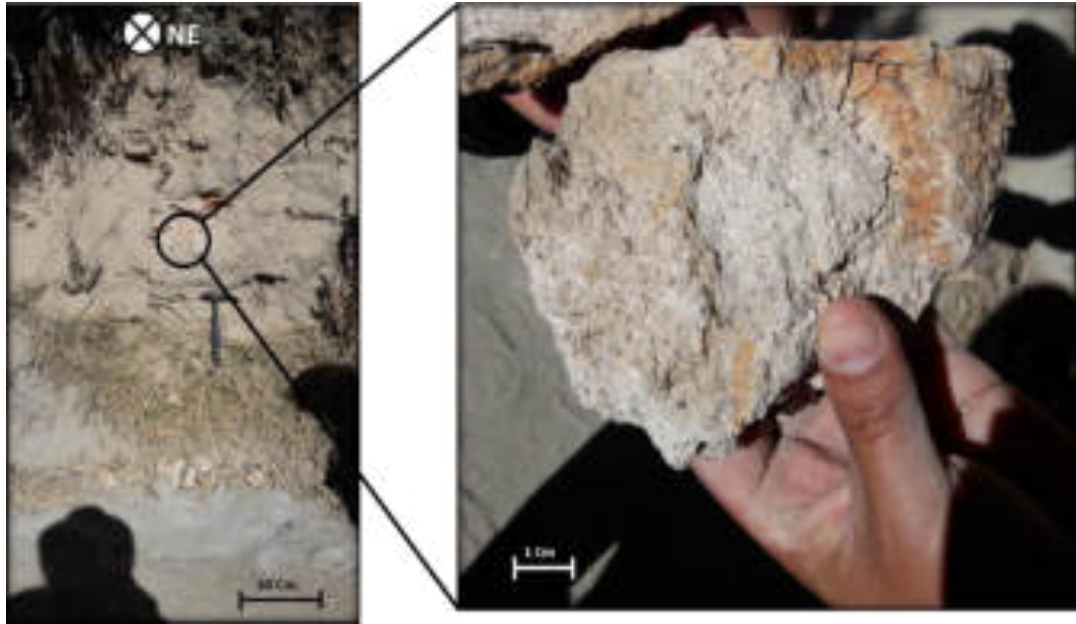


Figura 4.15 Afloramiento en el poblado de San Miguel Yuxtepec, se observaron andesitas intemperizadas con anfíboles, biotitas y plagioclasas, en una matriz con vidrio volcánico.



Figura 4.16 En la parte poniente de los domos, San Miguel Yuxtepec se observaron andesitas con texturas más afaníticas con presencia de epidotas y azufre y presencia de fallamiento.

4.8 Flujos Piroclásticos San Antonio Bonixi

Los flujos piroclásticos San Antonio Bonixi se localizan hacia la parte sur de los domos Santuario entre las poblaciones San Antonio Bonixi y San Miguel Yuxtepec (ver mapa geológico de figura 4.1 y anexo 5). Salinas-Sánchez (2013) reconoció estos flujos hacia los bordes de los domos describiéndolos como flujos piroclásticos de bloques y ceniza.

Los flujos piroclásticos San Antonio Bonixi también fueron observados en la parte norte y sur de los domos Santuario. En la parte norte, Santa Cruz Tepexpan, presentan aparentemente menor extensión en área y se presentan como una intercalación de flujos de bloques y ceniza con depósitos de ceniza. Los bloques de los flujos son de andesita (Fig. 4.17). En los afloramientos estudiados en San Antonio se presentan con una estratificación masiva y se presentan como flujos de bloques y ceniza con capas de depósitos de caída de ceniza volcánica de composición intermedia. Los bloques son de andesita con textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. En algunos afloramientos se observaron gravas fluviales que probablemente fueron incorporadas al flujo piroclástico durante su emplazamiento. Los depósitos de caída presentan fragmentos de vidrio volcánico y cristales de plagioclasas y biotitas (Figs. 4.18 y 4.19).



Figura 4.17 En la parte norte del domo Santuario, Santa Cruz Tepexpan, se presenta una secuencia de flujos piroclásticos. A, flujo de bloques y ceniza; B, depósito de caída de ceniza; C, flujo de bloques de andesitas y ceniza; D, flujo de ceniza con clastos de andesita y por último E es un depósito de caída de ceniza.



Figura 4.18 Flujos piroclásticos San Antonio Bonixi ubicados en San Antonio. 1 depósito de caída de ceniza de composición andesítica; 2, flujo piroclástico con bloques de andesita de hasta 10 cm.

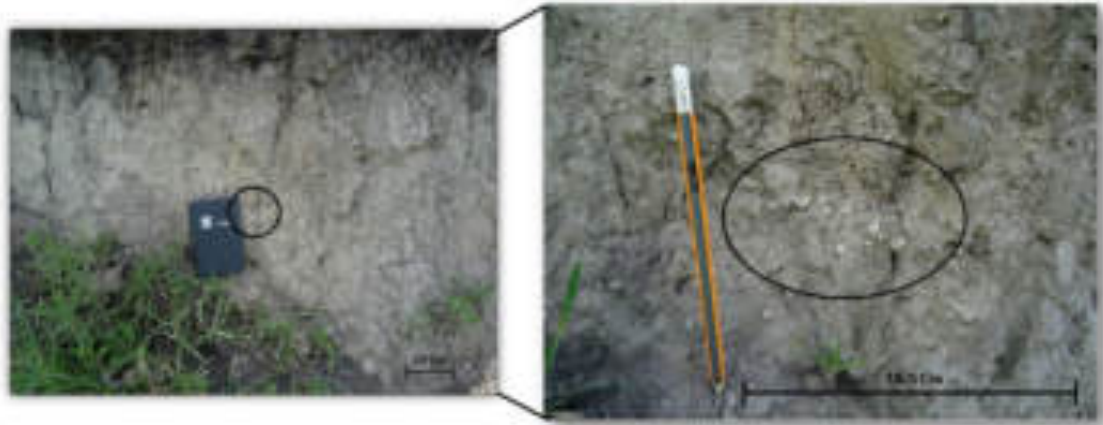


Figura 4.19 Afloramiento de flujos piroclásticos San Antonio Bonixi al sur de San Antonio. Este afloramiento presenta mayor proporción de ceniza, y pequeños clastos de andesítas.

Los flujos son sobreyacidos por paleosuelos y depósitos fluviales (Fig. 4.20). Esta unidad en su parte oriental son sobreyacidos por los flujos piroclásticos Portezuelo que se consideraron parte de la Sierra de Las Cruces en ca. 3.7 Ma y podrían ser casi contemporáneos con la Unidad San Lorenzo Toxico, y son contemporáneos al emplazamiento de domos Santuario; estas relaciones estratigráficas sugieren una edad Plioceno-Pleistoceno para estos flujos.



Figura 4.20 Se puede ver en la imagen los flujos piroclásticos San Antonio Bonixi. En la capa A, el flujo es de bloques andesíticos y ceniza volcánica; en la capa B se puede observar un paleosuelo que cubre al flujo piroclástico; en la capa C corresponde a un depósito de caída de ceniza volcánica y en la capa D se presenta un conglomerado con matriz de arena fina.

4.9 Unidad Llano Grande

La unidad de depósitos piroclásticos Llano Grande se ubica entre Jilotepec y los domos Santuario (domos Ixtlahuaca), a 6 km al poniente de Jilotepec y a 1.5 km al oriente de los domos Santuario (domos Ixtlahuaca). En la cartografía de Salinas-Sánchez (2013) los describe como depósitos fluvio-lacustres y piroclastos.

La Unidad Llano Grande está constituida por flujos de pómez y ceniza y depósitos de caída de pómez (Figs. 4.21 y 4.22) (ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 5). La pómez es de composición andesítica. En la parte superior de estos depósitos se observaron depósitos fluviales compuestos de gravas y limos arenosos. Los afloramientos se distribuyen a lo largo de poblaciones locales como Llano Grande, El Madroño y San Martín Morelos.

Los depósitos piroclásticos de Llano Grande sobreyacen a los flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi y a los flujos piroclásticos Jiquipilco por lo que se pueden considerar de un rango de edad Plioceno-Cuaternario.

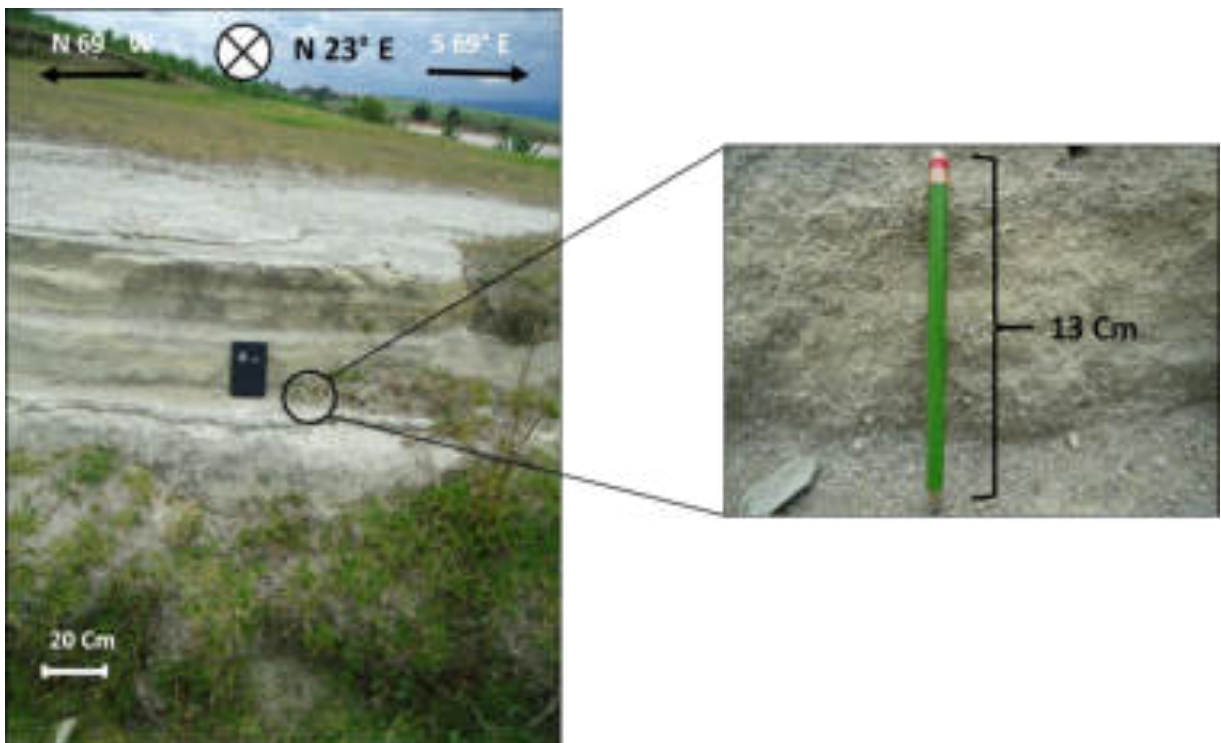


Figura 4.21 Depósito de caída de pómez.



Figura 4.22 Planicie de depósitos piroclásticos de Llano Grande.

4.10 Volcán la Venta

El volcán La Venta toma el nombre del cerro La Venta y se ubica a 8 km al suroeste de la población de Ixtlahuaca y en el extremo poniente de la traza de la falla Ixtlahuaca (ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 5). En la cartografía de IFOMEGEM (1995) fue cartografiado como un volcán formado por derrames de lava basáltico-andesítico y con depósitos de ceniza.

En este trabajo el volcán se observó formado por derrames de lava andesítica y depósitos piroclásticos de composición intermedia. Los derrames de lava presentan andesita de textura afanítica y color gris oscuro. Los depósitos piroclásticos que se presentan en sus laderas son depósitos piroclásticos de pómez y ceniza, algunos de caída y otros como unidades de flujo. Los depósitos piroclásticos presentan líticos de andesita y pómez y un color gris oscuro a claro; con laminaciones paralelas y onduladas (Figs. 4.23, 4.24, 4.25, y 4.26) y presentan intercalaciones de depósitos de ceniza y a veces presencia de paleosuelos.

Los depósitos de este volcán cubren al escarpe de la falla Ixtlahuaca en San Juan de las Manzanas, y sobreyacen de igual forma a la unidad San Lorenzo Toxico y a productos volcánicos del volcán la Guadalupana. La forma del cono y que es cono piroclástico sugiere que se pueda tratar de conos de que se ubican alrededor de la Cuenca del valle de Ixtlahuaca del Pleistoceno.

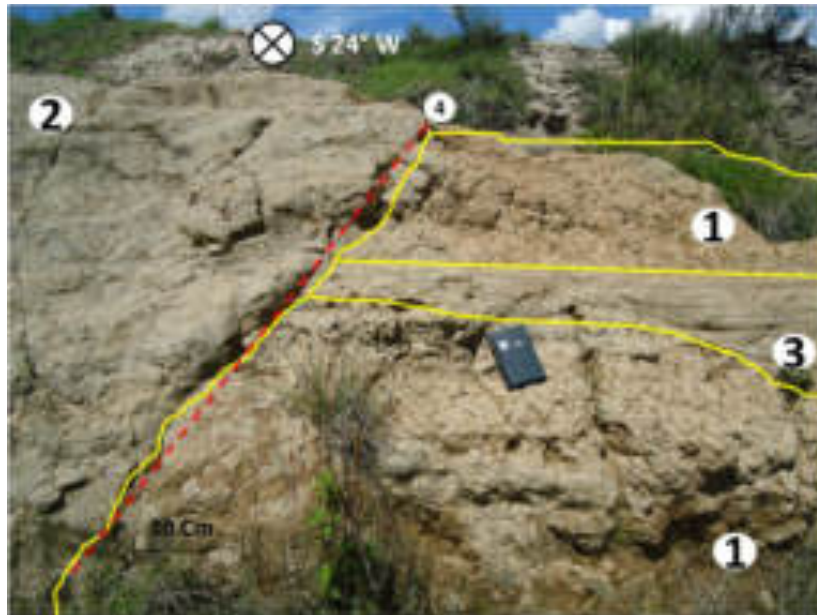


Figura 4.23 Se presenta una secuencia de depósitos piroclásticos afectados por una falla. 1, depósitos de ceniza con líticos de andesita; 2, depósitos de pómez con líticos de andesitas y 3, depósitos laminados de caída de pómez y líticos volcánicos.



Figura 4.24 Derrames de lava andesítica autobrechados con plagioclasas como fenocristales.



Figura 4.25 Depósito piroclástico de ceniza y pómez.

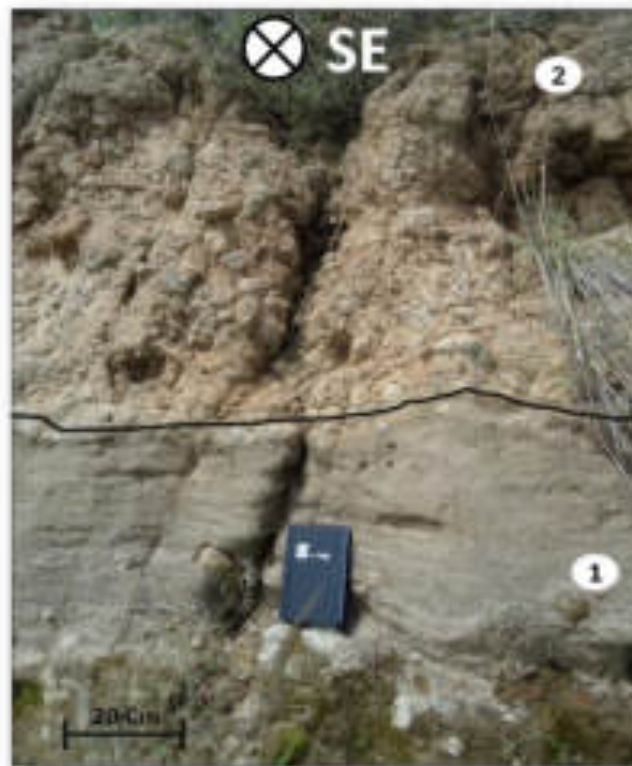


Figura 4.26 Depósitos piroclásticos en volcán La Venta. 1, depósito piroclástico de pómez y 2, depósito piroclástico con bloques de andesita con una matriz de ceniza.

4.11 Unidad Lacustre Toxico

La unidad lacustre Toxico aflora desde la población Mayorazgo de León (al sur y fuera del área de estudio) hasta la población de San Jerónimo Ixtapantongo. La unidad lacustre Toxico fue cartografiada por Sánchez-Rubio (1984) como Formación Ixtapantongo y con una distribución desde Toluca, valle de Ixtlahuaca hasta llegar al graben de Acambay. La describe como una secuencia de sedimentos lacustres y fluviales intercalados con depósitos vulcanoclásticos de ceniza y pómez de caída, y que tienen espesores mayores a los 70 m.

En este trabajo se observó que su distribución abarca desde San Lorenzo Toxico hasta mayorazgo de León (fuera del área de estudio) (ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 5). La unidad lacustre Toxico está compuesta de depósitos lacustres, fluviales, paleosuelos, y algunos depósitos de caída con pómez y ceniza (Fig. 4.27). Estos depósitos presentan colores claros y blancos, su espesor es variable observándose algunos espesores de 10 m, 6 m a 4 m.

Los depósitos fluvio-lacustres están compuestos de depósitos de gravas, arenas, limos y arcillas. Estos presentan un color blanco a beige claro en afloramiento. Se observan las gravas formando una relación lenticular con las arenas y limos en ocasiones; presentan líticos de rocas volcánicas andesíticas y dacíticas. Los depósitos fluvio-lacustres en ocasiones se presentan intercalados o sobreyaciendo a secuencias de paleosuelos y limos lacustres. En el interior de los depósitos fluvio-lacustres se pueden observar troncos carbonizados o raíces. Algunas capas de limos y arcilla pueden tratarse de diatomitas.

Los paleosuelos se presentan intercalados con arenas y limos fluvio-lacustres; muestran una estructura columnar y laminada y en los afloramientos se observa un mayor grado de intemperismo en comparación con los limos y/o arenas lacustres.

Los paleosuelos presentan antiguas raíces de plantas y troncos leñosos antiguos, y los contactos de las capas superiores de paleosuelos son rectos e indican una

erosión por parte de los depósitos fluviales. En algunas bases de capas de paleosuelos se observaron marcas de desecación.

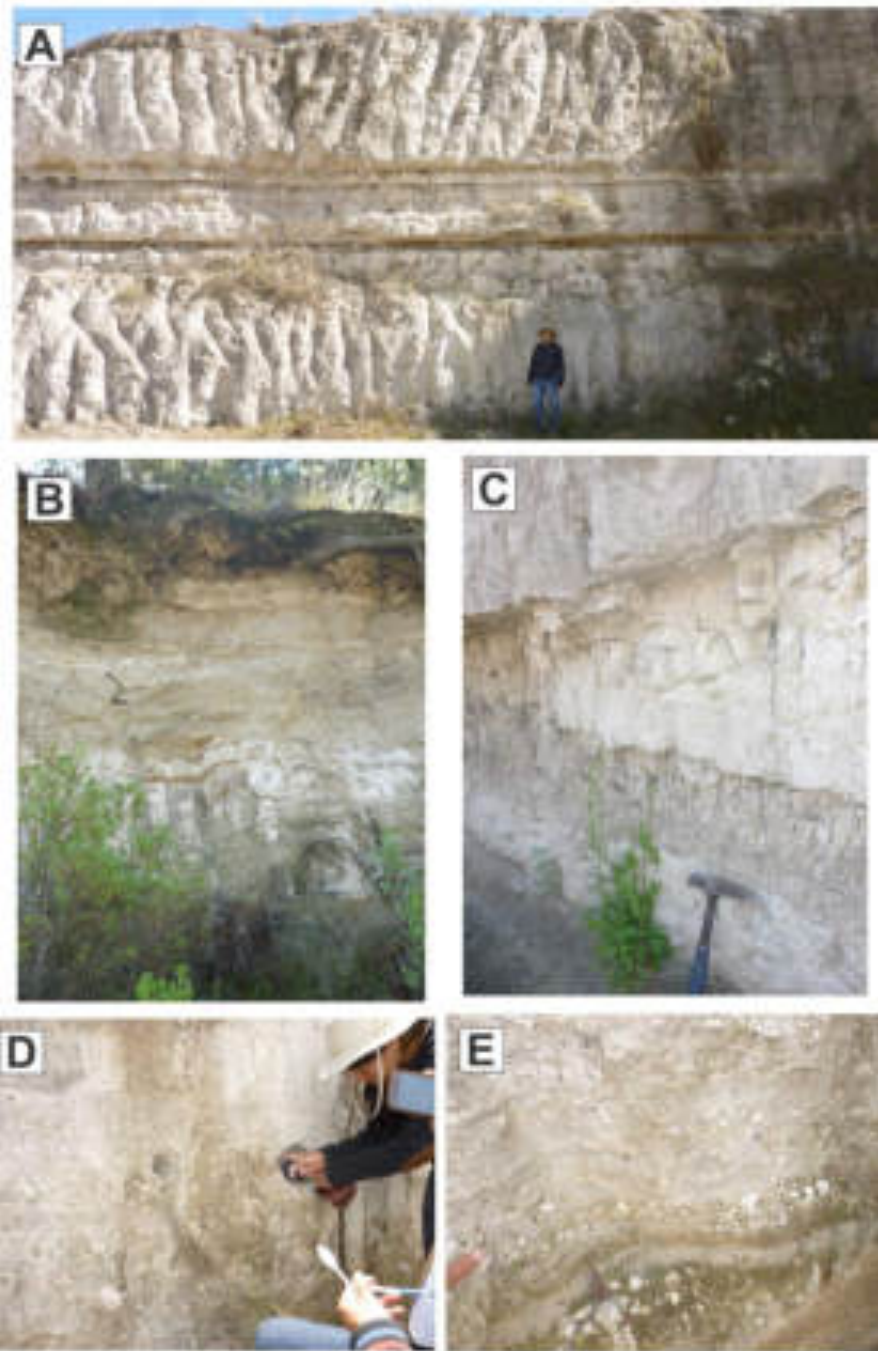


Figura 4.27 Unidad lacustre Toxic. A, secuencia de depósitos lacustres, fluvio-lacustres y paleosuelos; B, unidad San Lorenzo Toxic de oleadas piroclásticas subyace a depósitos fluvio-lacustres de la unidad lacustre Toxic; C, secuencia de limos arcillosos y paleosuelos de la unidad lacustre Toxic; D, gravas y arenas gruesas con líticos volcánicos y pómez redondeados de la unidad lacustre Toxic; E, capas de gravas y arenas con laminación cruzada.

La unidad lacustre Toxico se observó sobreyaciendo a los depósitos piroclásticos de la unidad San Lorenzo Toxico. Los sedimentos fluvio-lacustres de la unidad lacustre Toxico también se observan sobreyaciendo a la unidad de flujos piroclásticos San Antonio Bonixi (Fig. 4.28). La unidad lacustre Toxico también cubre a la falla Ixtlahuaca. Estas relaciones estratigráficas sugieren que la edad de esta unidad es más joven que los ca. 3 Ma y que puede correlacionarse en parte con la Formación Ixtapantongo de Sánchez-Rubio (1984) que le asigna un rango de edad de 23,180 a 1,880 años aproximadamente.



Figura 4.28 Depositos lacustres y paleosuelos de la unidad lacustre Toxico sobreyaciendo a flujos piroclásticos de bloques y ceniza de la unidad San Antonio Bonixi. A, flujo piroclástico de bloques y ceniza; B se ve un pequeño paleosuelo y C, depósito lacustre y depósito de ceniza.

4.12 Abanicos Aluviales Santuario

Los abanicos aluviales Santuario (Fig. 4.29) afloran en los alrededores de los domos Santuario (ver mapa geológico en figura 4.1 y anexo 2) y en poblados de la Colonia la Purísima y San Martín Morelos (Fig. 4.30). En estos sitios se presentan en varias facies de abanicos aluviales, como sedimentos arenosos con gravas y variación de granulometría en las arenas. En otros lugares se observó mayor proporción de arcillas en la matriz con clastos erráticos de andesitas y dacitas; sobreyacidos por capas de sedimentos volcánicos re TRABAJADOS. La edad que se considera para estos abanicos aluviales es del holoceno ya que se encuentran sobreyaciendo a todas las unidades volcánicas del Plioceno-Pleistoceno y que han sido descritas anteriormente.



Figura 4.29 Abanicos aluviales Santuario, la imagen a la derecha corresponden a los abanicos cerca de San Miguel Yuxtepec y a la izquierda a los abanicos cerca de Santa Cruz Tepexpan.



Figura 4.30 Depósito de abanico aluvial en San Martín Morelos, con clastos de andesitas se presenta una matriz de arena gruesa.

4.13 Depósitos fluviales Santa Isabel

Los depósitos fluviales Santa Isabel se nombran así a varios depósitos fluviales que se ubican en los valles fluviales que disecan a la unidad de flujos piroclásticos Portezuelo. Estos depósitos se localizan a 3 km al suroeste de Jiquipilco.

En la comunidad de Santa Isabel los depósitos fluviales presentan una secuencia de gravas con arenas gruesas con clastos de roca andesítica. Los clastos se presentan redondeados a subredondeados dentro de una matriz arenosa (Fig. 4.31). Los depósitos fluviales tienen fragmentos de antiguos depósitos piroclásticos de ceniza.

Los depósitos fluviales Santa Isabel sobreyacen a flujos piroclásticos del complejo volcánico de Sierra de Las Cruces (Fig. 4.32). La edad considerada para estos depósitos fluviales es del Holoceno.



Figura 4.31 Depósitos fluviales Santa Isabel que sobreyacen a depósitos piroclásticos. Los clastos en el depósito fluvial son de andesita y se observan fragmentos de roca piroclástica incluido en el depósito fluvial.



Figura 4.32 Cerca de Portezuelo, se observó este depósito fluvial de la unidad Santa Isabel. Esta constituido de clastos redondeados de andesitas y presentando arenas de grano medio.

4.14 Depósitos volcánicos y Fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca

Los depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del valle de Ixtlahuaca abarcan los depósitos ubicados en las partes bajas desde la falla Ixtlahuaca hasta Atlacomulco en sentido norte-sur y desde las laderas del volcán Jocotitlán hasta la falla Perales en sentido este-oeste. En la cartografía de IFOMEGEM (1995) estos depósitos son considerados depósitos lacustres y fluviales con capas de piedra pómez. Sánchez-Rubio (1984) describe depósitos fluvio-lacustres de la Formación Ixtapantongo dentro del valle de Ixtlahuaca e Israde-Alcántara et al. (2010) describe una secuencia de depósitos de pómez, con paleosuelos, depósitos fluvio-lacustres y diatomitas en las cercanías de la población de Ixtlahuaca.

En este trabajo se decide separar los depósitos fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca de las unidades sedimentarias de la parte sur de la falla Ixtlahuaca ya que existen variaciones en la estratigrafía.

En la cuenca de Ixtlahuaca se presentan los depósitos fluvio-lacustres que describió Israde-Alcántara et al. (2010) con presencia de diatomitas, aparecen depósitos piroclásticos del volcán Jocotitlán que comprenden depósitos de caída, lahares y algunos flujos piroclásticos (Salinas-Sánchez, 2013). En la columna estratigráfica

integrada por DeJesús-García (2018) (Fig. 4.33) se muestra la relación con las unidades definidas para este trabajo de la falla Ixtlahuaca.

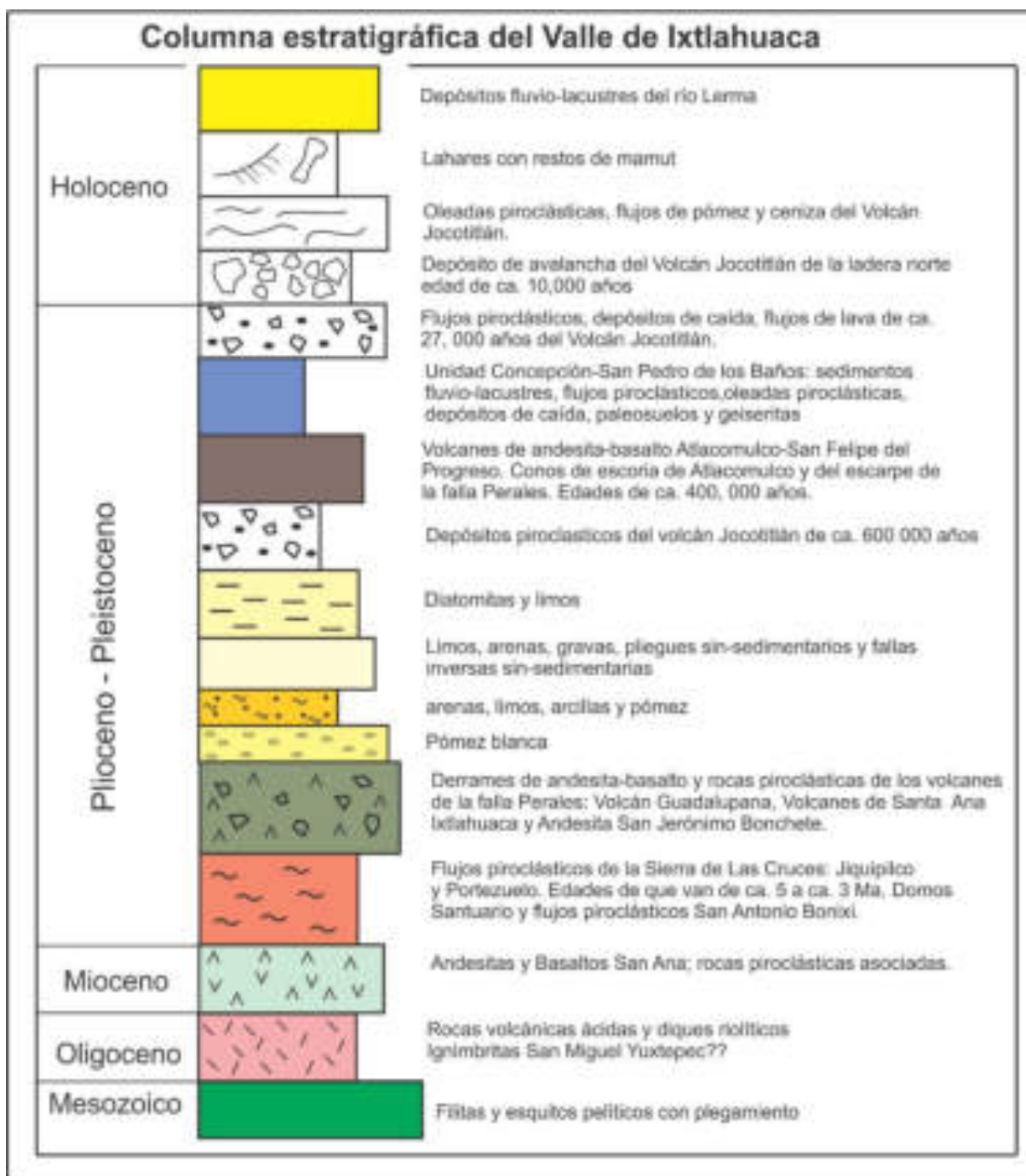


Figura 4.33 Columna estratigráfica del Valle de Ixtlahuaca elaborada por DeJesús-García. (2018) a partir de sus resultados y la compilación de datos geológicos de los trabajos: Sánchez-Rubio, 1984; Israde-Alcántara et al., 2010; Salinas-Sánchez, 2013.

4.15 Depósitos fluviales del Río Lerma

Los depósitos fluviales del río Lerma en la cartografía de IFOMEGEM (1995) son identificados como aluvión, grava, arena y limos con interestratificaciones de ceniza volcánica.

En este trabajo también se observaron depósitos de arenas, gravas y limos. Muchos de estos depósitos están cubiertos por suelos recientes con vegetación arbórea que crece en los bordes del canal fluvial y son cubiertos también por suelos de tipo agrícola (Fig. 4.34). Estos depósitos fluviales están a lo largo del curso del río Lerma y cortan a unidades fluvio-lacustres del valle de Ixtlahuaca, así como depósitos piroclásticos en el valle. En la parte sur de la falla Ixtlahuaca el río Lerma y sus depósitos fluviales cortan a la unidad San Lorenzo Toxico y la unidad lacustre Toxico (Fig. 4.35), así como a flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi. Estos depósitos fluviales del río Lerma se consideran del Holoceno.



Figura 4.34 Río Lerma al Sur de la falla Ixtlahuaca.

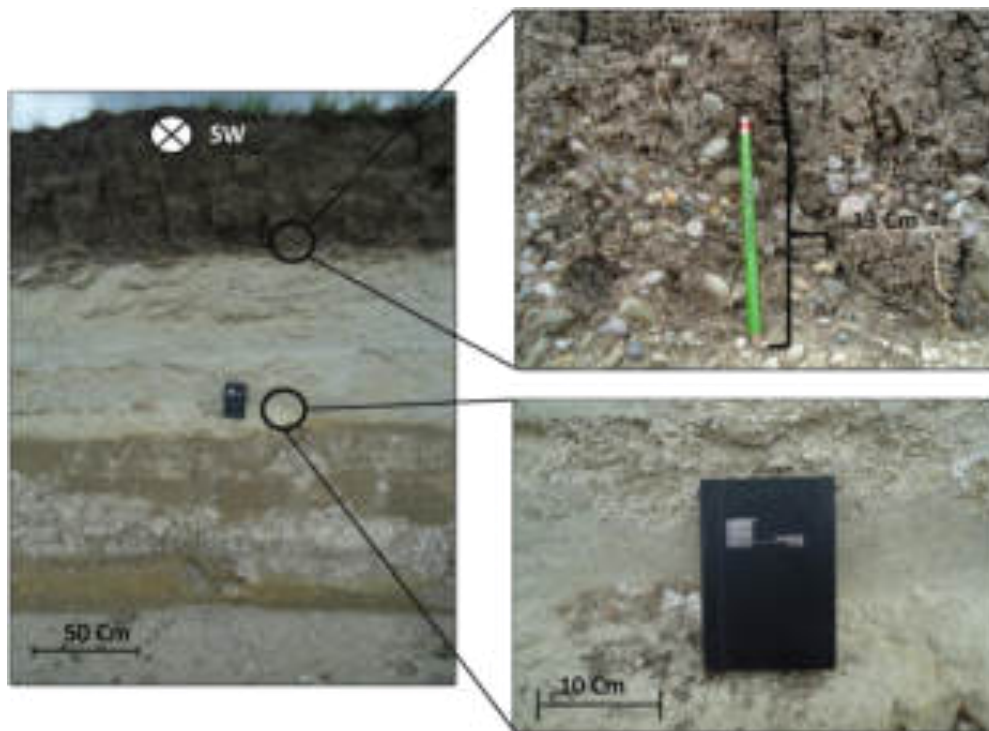


Figura 4.35 Se observa diferentes estratos de caída de ceniza, sobre este flujo de pómez y por último un conglomerado con clastos de andesitas, en una matriz arenosa

CAPÍTULO 5

Resultados: Geología Estructural

En el área de estudio, falla Ixtlahuaca, se identificaron cuatro sistemas de fallas: sistema de fallas Ixtlahuaca (SFI), sistemas de fallas Toxico (SFT), sistema de fallas NW-SE y sistema de fallas de la Sierra de Las Cruces (SFSC). Estos sistemas de fallas y fracturas se identificaron con base en la identificación de lineamientos estructurales por medio de fotointerpretación geológica y posterior verificación y cartografía geológico-estructural en campo. Los criterios empleados para su diferenciación fueron su actitud estructural, las unidades geológicas que corta y las unidades geológicas que las cubren. Los datos estructurales de las estaciones de análisis de campo detallado se pueden consultar en la tabla de fallas y fracturas (en anexos) mientras que los cuatro sistemas de fallas se pueden ver en el mapa geológico-estructural (Fig. 5.1 y anexo 6); en este mapa se muestran las fracturas y fallas verificadas en campo y lineamientos estructurales interpretados probables. A continuación, se describen los cuatro sistemas de fallas.

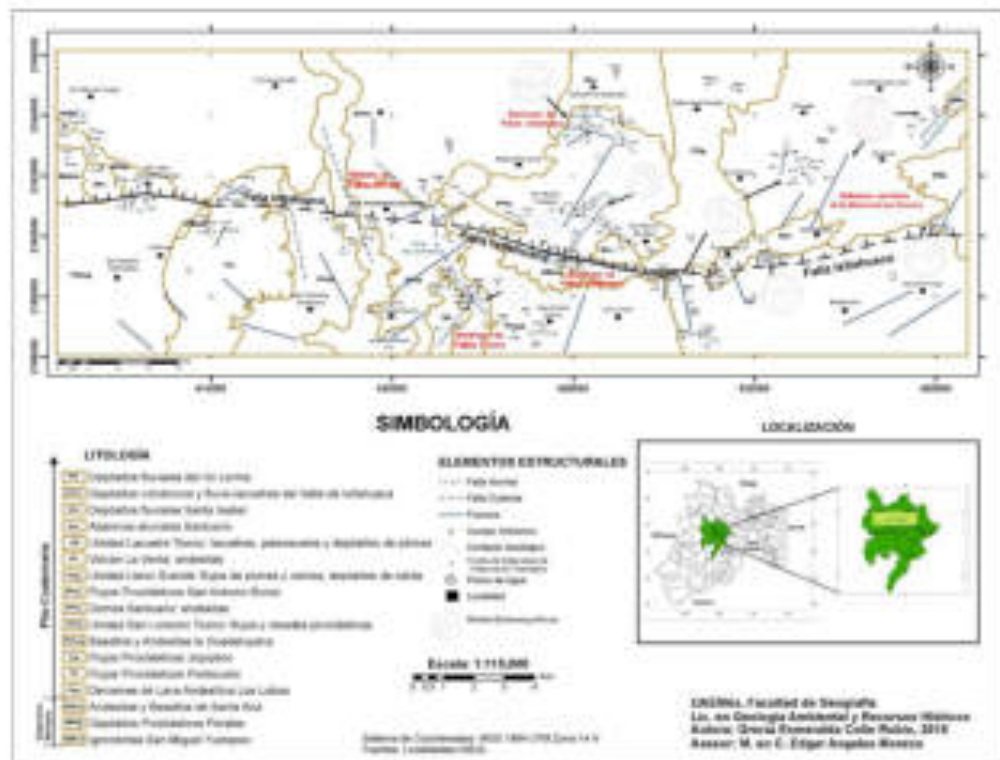


Figura 5.1 Mapa Geológico-Estructural de la falla Ixtlahuaca.

5.1 Sistema de fallas Ixtlahuaca (SFI)

5.1.1 Falla Ixtlahuaca (FI)

La falla Ixtlahuaca (FI) está ubicada dentro de los municipios de Ixtlahuaca y Jiquipilco en el Estado de México. García-Palomo et al. (2008) describe que es una falla normal orientada E-W con un buzamiento hacia el norte y que tiene una longitud de 30 km y un ancho de 6 km. Para Ortiz-Pérez y Bocco. (1989) la falla tiene una clara expresión morfológica con base en su análisis de densidad de disección y de fracturamiento, y que además limita bloques morfoestructurales (mega bloques). En este trabajo se considera que la FI va desde la localidad San Juan de Las Manzanas hasta las cercanías con el cerro Catedral (fuera del área de estudio) pasando por Jiquipilco sin embargo García-Palomo et al. (2008) considera que la FI se prolonga a la falla Otomí y que cruzaría a la Sierra Las Cruces.

En este trabajo se encuentra que la falla Ixtlahuaca no aflora a lo largo de todo su rumbo ya que está parcialmente cubierta por algunos depósitos volcánicos y sedimentos. Para este trabajo la falla tiene una longitud cerca de 30 km y va desde el volcán La Guadalupana hasta Jiquipilco en las cercanías de la población Santa Isabel (ver mapa geológico). La FI tiene varias fracturas y fallas asociadas de menor longitud dentro de su zona de daño y que serán descritas adelante.

La falla Ixtlahuaca (FI) tiene una orientación que tiene cambios en su rumbo. En San Juan de Las Manzanas tiene un rumbo E-W con echado hacia el norte que varía de 60° a 70° y a la altura de San Jerónimo Ixtapantongo, que está cubierta, cambia su rumbo para aparecer en el sur de los domos Santuario con rumbo N70°W y echado de 60° al Norte y en las cercanías de Jiquipilco tiene un rumbo N70°E a E-W. En el área de San Jerónimo Ixtapantongo parece estar oculta una falla lateral con rumbo N-S a NW-SE que desplaza a la falla Ixtlahuaca y que se nombra en este trabajo como falla San Jerónimo (descrita más adelante).

La falla es de tipo normal ya que corta en San Juan de Las Manzanas a rocas de las ignimbritas San Miguel Yuxtepec, rocas volcánicas del volcán La Guadalupana

y depósitos piroclásticos Perales, mientras que es cubierta por derrames de andesita del volcán La Venta y por la unidad San Lorenzo Toxico. En el área del sur de los domos Santuario es cubierta por rocas de estos domos y la unidad de flujos piroclásticos San Antonio Bonixi para luego aflorar en el extremo sureste de los domos cortando las ignimbritas San Miguel Yuxtepec. La FI en Jiquipilco corta a las unidades de flujos piroclásticos Jiquipilco sin embargo parece ser ocultada parcialmente por la unidad de flujos piroclásticos Portezuelo a la altura de Santa Isabel.

En el área de San Juan Las Manzanas la falla Ixtlahuaca corta a la falla Perales y en San Jerónimo Ixtapantongo es cortada por una falla oculta que tiene un rumbo N-S a NW-SE denominada falla San Jerónimo.

Con base a las anteriores relaciones de campo la FI ha tenido diferentes pulsos de fallamientos de acuerdo con el análisis de los datos de campo. Se interpreta que la actividad más antigua fue en el Oligoceno-Mioceno donde afecto a las Ignimbritas de San Miguel Yuxtepec y porque es considerada una falla profunda. El segundo período de actividad de la falla fue después de la formación de las rocas volcánicas del cerro La Catedral del complejo volcánico Sierra de Las Cruces (ca. 3.7 Ma) y antes del emplazamiento de los domos Santuario (ca. 3 Ma), esto es en el Plioceno.

Es probable que haya habido una última actividad después de los domos Santuario, ya que existe un desplazamiento vertical muy pequeño, y fue antes de la formación de la unidad San Lorenzo Toxico que ubicaría esta actividad en el Cuaternario.

La falla Ixtlahuaca (FI) se puede correlacionar con las fallas que se encuentran en el sistema de fallas Morelia-Acambay (Jonnhson y Harrison, 1990) ya que presentan una edad cercana con algunos períodos de actividad en el Plio-Cuaternario y por la orientación E-W.

5.1.2 Fallas menores

El sistema de fallas Ixtlahuaca (SFI) está compuesto por fallas menores y algunas fracturas que corresponden a los lineamientos con orientaciones E-W y algunas otras NW-SE. Estas fallas se localizan al alto y bajo de la falla Ixtlahuaca y se encuentran dentro de la zona de daño de esta falla. Las fallas presentan longitudes que varían de 100 m a 700 m con orientaciones de E-W, N70°W-S70°E, y N70°E-S70°W. Estas fallas son fallas normales con echados variables de 50° a 70° al Norte o Sur. Estas fallas ayudan a definir la zona de daño de la falla Ixtlahuaca.

Estas fallas cortan a rocas de las unidades ignimbritas San Miguel Yuxtepec, flujos piroclásticos San Antonio Bonixi, domos Santuario y unidades de flujos piroclásticos Jilotepec y Portezuelo.

En el afloramiento ubicado al sur de los domos Santuario (domos Ixtlahuaca) (punto en el mapa geológico FI91) las fallas y fracturas menores se observaron cortando a la unidad de ignimbritas San Miguel Yuxtepec y poniendo la estratificación de estas casi verticales. Algunos datos estructurales son de S70°W, 67°NW y S70°E, 69°SW en este punto se tiene el núcleo de la falla Ixtlahuaca y parte de la zona de daño, el afloramiento ayuda a definir el trazo de la falla Ixtlahuaca en la zona de los domos (Fig. 5.2-A). En este punto de observación geológica se observó una brecha de falla y una falla orientada al E-W, 68°N que es la falla Ixtlahuaca y que corta a flujos piroclásticos y a derrames andesíticos (Fig. 5.2-B).

En el área del volcán La Venta afloran las ignimbritas San Miguel Yuxtepec que son afectadas por fracturas y fallas menores con orientaciones de E-W, 90°. (Fig. 5.3).

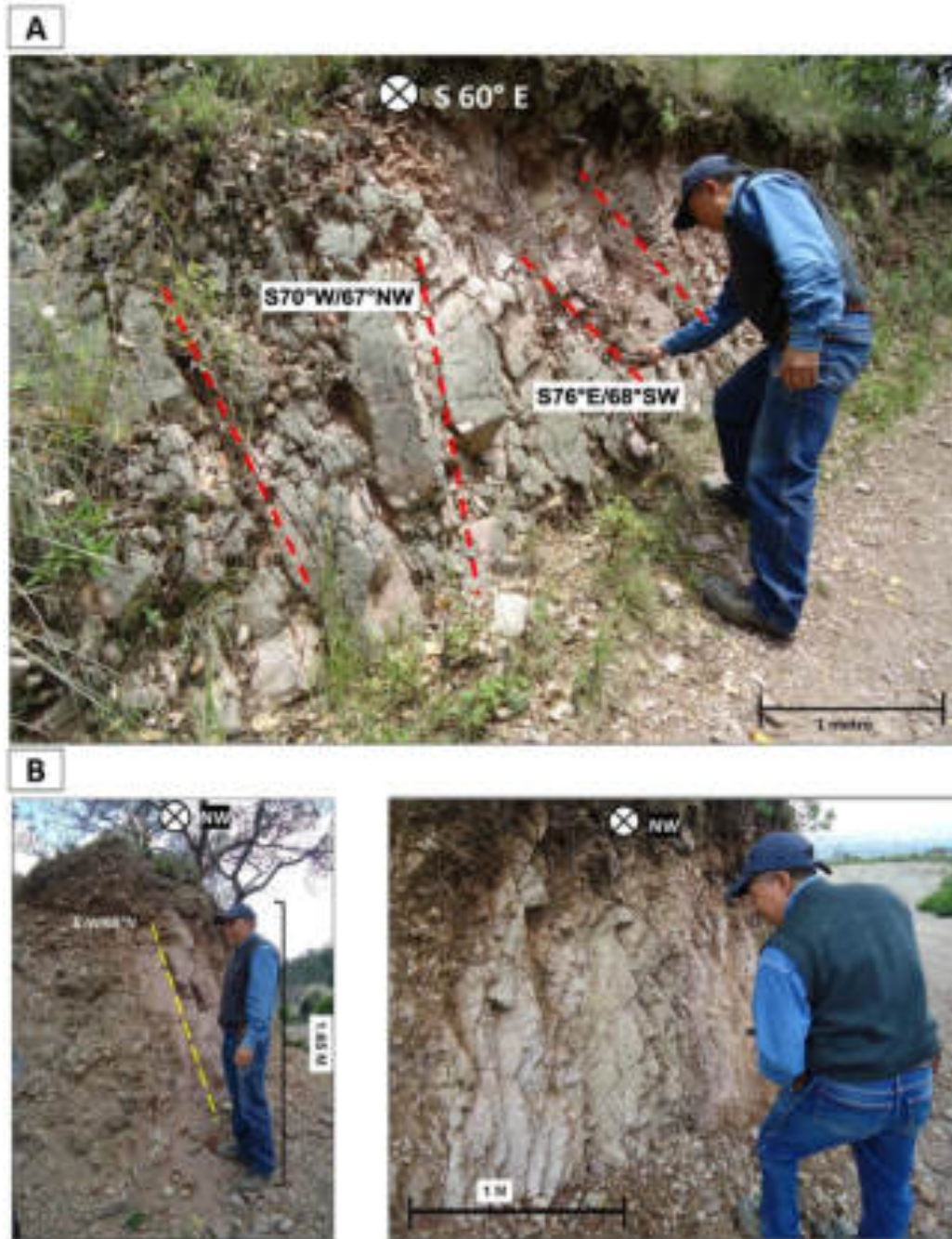


Figura 5.2 La imagen A muestra las fallas en las ignimbritas orientadas al SW y SE mientras que en la B se observa una falla E-W en una brecha de falla.



Figura 5.3 Falla Ixtlahuaca en ignimbritas ubicadas al NW del Volcán la Venta.

En el norte de los domos Santuario se registraron varias fallas y fracturas que están asociadas al sistema de fallas Ixtlahuaca. En la estación o punto de observación FI92 (ver mapa geológico-estructural de la figura 5.1 y anexo 6) una falla normal con orientación E-W y echado de 90° se encuentra afectando una serie de flujos piroclásticos de ceniza, pómez y bloques de andesitas (Fig. 5.4-A); otra falla normal en FI94 corta a los derrames andesíticos con biotitas moscovitas y plagioclasas y tiene una orientación E-W con echado de 65° S esta zona presenta múltiples fallas y fracturas (Fig. 5.4-B). Por último, en el punto FI95 hay fracturas con orientaciones $S55^\circ$ W y $S86^\circ$ E que afectan a flujos piroclásticos de ceniza y andesitas (Fig. 5.4-C). Algunas fracturas cercanas a estas fallas están rellenas de material arcilloso y no presentan un movimiento significativo de los estratos.



Figura 5.4 En la figura A se aprecian flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi afectados una falla E-W con echado de 90° . La figura B muestra una falla E-W, $65^\circ S$ afectando a andesitas de los domos Santuario y que se encuentra en una zona de falla ya que abundan fracturas alrededor de está. En la figura C, muestra dos fracturas con rumbos NE-SW y NW-SE, que afectan flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi.

En la región de Jiquipilco las fallas y fracturas menores del SFI las fracturas tienen rumbo E-W y afectan a flujos piroclásticos Portezuelo (punto FI58). Derrames andesíticos de la unidad Los Lobos también son afectados por fallas menores del SFI y tienen rumbo $N85^\circ W-S85^\circ E$ (punto FI60). Dentro de la zona de los depósitos fluviales del río Lerma en el punto FI76 (ver mapa geológico-estructural de la figura

5.1 y anexo 6) la fractura que se registró se ubica tiene una orientación E-W con echado de 76°N , y afecta a un flujo piroclástico de pómez, lapilli y ceniza.

5.2 Sistema de fallas Toxico (SFT)

El sistema de fallas Toxico (SFT) es un sistema de fallas normales con orientaciones NE-SW que se ubican en la zona de las poblaciones de San Lorenzo Toxico y San Miguel Yuxtepec (Figura 5.1).

Las fallas del SFT tienen una longitud mínima y variable de 6 km a 500 m. Los rumbos varían de $\text{N}30^{\circ}\text{E}-\text{S}30^{\circ}\text{W}$, $\text{N}50^{\circ}\text{E}-\text{S}50^{\circ}\text{W}$ y $\text{N}65^{\circ}\text{E}-\text{S}65^{\circ}\text{W}$; y echados de 60° a 80° al NW y SE (ver mapa geológico-estructural en figura 5.1 y anexo 6). Las fallas son de tipo normal con rocas de fallas de brechas de falla. Las fallas desplazan a rocas de las unidades de domos Santuario, flujos piroclásticos San Antonio Bonixi y la unidad San Lorenzo Toxico.

En la unidad San Lorenzo Toxico se observó una falla normal con orientación $\text{S}36^{\circ}\text{W}$, 74°NW , que corta a flujos de pómez y flujos de pómez y ceniza (punto FI19); así también otras fallas con rumbo $\text{N}74^{\circ}\text{W}$ y echado de 47°SW y $\text{N}78^{\circ}\text{W}$ con echado de 46°NE son cortadas por fallas NE-SW y estas fallas cortan a depósitos de caída de ceniza con presencia de biotitas y un flujo piroclástico con lapilli (punto FI19).

Las fallas NE-SW del SFT en los domos Santuario (domos Ixtlahuaca) cortan a las andesitas de estas estructuras volcánicas. Los rumbos de estas fallas varían de $\text{N}30^{\circ}\text{E}-\text{S}40^{\circ}\text{W}$ a $\text{N}45^{\circ}\text{E}-\text{S}45^{\circ}\text{W}$ con echados de 45° a 80° al NW o SE (puntos de observación FI09, FI11, FI80, FI81, FI100) (Figs. 5.5 y 5.6). Los flujos piroclásticos San Antonio Bonixi que se encuentran alrededor de estos domos Santuario también son cortados por estas fallas NE-SW con rumbos de $\text{N}30^{\circ}\text{E}-\text{S}30^{\circ}\text{W}$ a $\text{N}45^{\circ}\text{E}-\text{S}45^{\circ}\text{W}$ (Fig. 5.7).

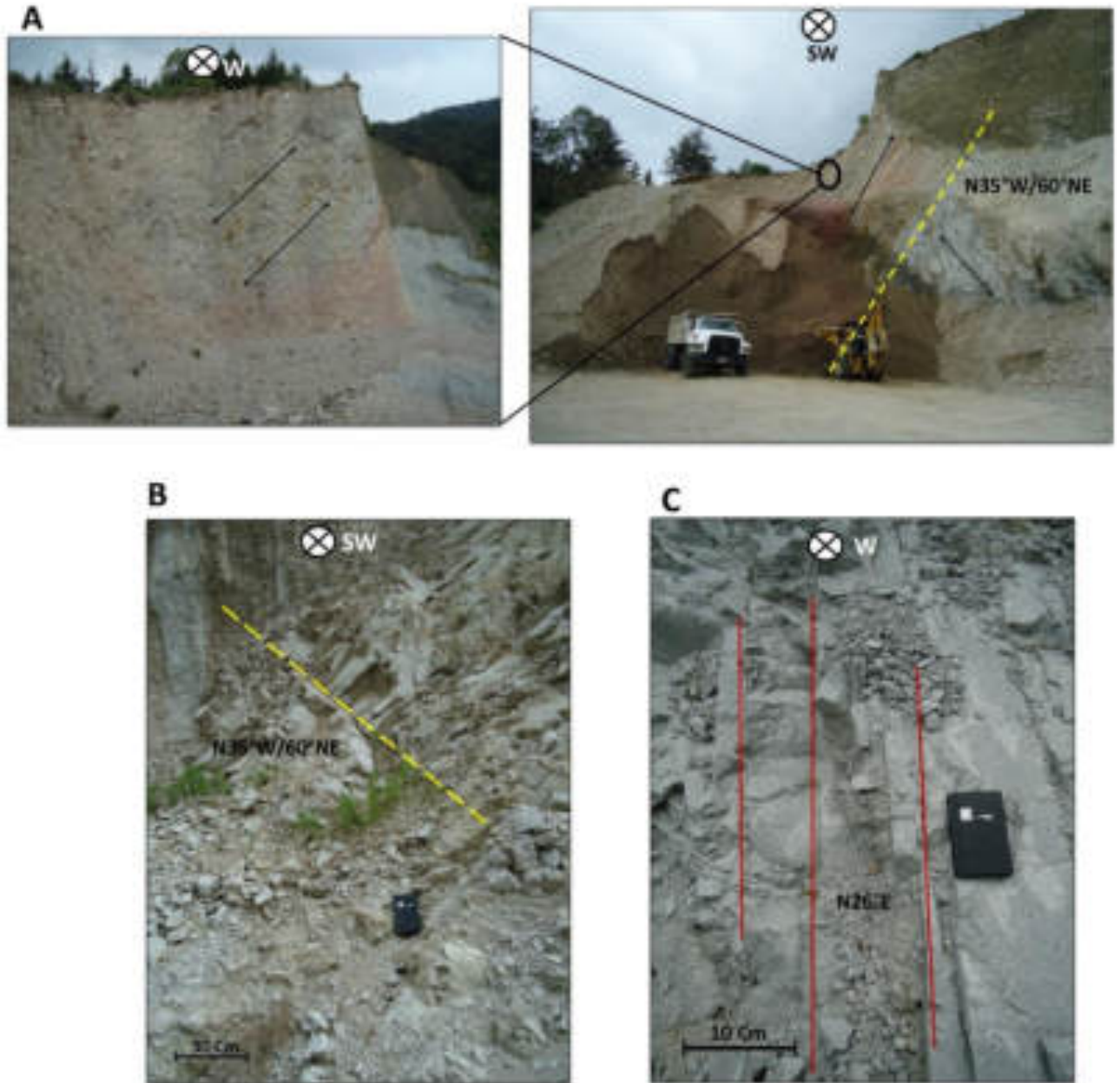


Figura 5.5 Sistemas de fallas NE-SW y NW-SE en la parte norte de los domos Santuario. La imagen A presenta a la falla con actitud estructural de N35°W, 60°NE (punto de observación F1100) que afecta a flujos piroclásticos que sobreyacen a andesitas hipabisales. La figura B presenta fracturas en las andesitas hipabisales de los domos. La figura C muestra fracturas NE-SW en andesitas.



Figura 5.6 Fractura con rumbo de $S48^{\circ}W$, afectando bloques de andesitas-basálticas en los domos Santuario (punto de observación FI09).



Figura 5.7 Falla con actitud estructural $S45^{\circ}W, 72^{\circ}NW$, que afecta los flujos piroclásticos de bloques y ceniza (punto de observación FI80).

En la localidad San Miguel Yuxtepec y parte poniente de los domos Santuario se observaron fallas NE-SW del sistema de fallas Toxico (SFT) que afectan a andesitas de los domos, por ejemplo, en el punto de observación FI10 (ver mapa geológico-estructural) una falla normal afectó a andesitas con un rumbo de $N63^{\circ}E$ y echado de $46^{\circ}SE$.

La edad de la actividad de este sistema de fallas Toxico (SFT) se puede considerar posterior al sistema de fallas Ixtlahuaca, al emplazamiento de los domos Santuario y la unidad San Lorenzo Toxico. Estas relaciones de corte sugieren que la actividad de las fallas del SFT es posterior al Pleistoceno y pudiera su actividad de fallamiento alcanzar el Holoceno.

5.3 Sistema de fallas NW-SE

El sistema de fallas NW-SE son fallas que se ubican tanto al alto y bajo de la falla Ixtlahuaca. Estas fallas se presentan con longitudes de 100 m hasta 1 km.

Las fallas de este sistema NW-SE presentan rumbos en específico que varían de N60°W-S60°E a N30°W-S30°E con echados que varían de 40° a 60° al NE o SW (ver mapa geológico-estructural de figura 5.1 y anexo 6). Las fallas afectan a la mayoría de las unidades geológicas al alto y al bajo de la falla Ixtlahuaca excepto a la unidad de fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca.

Este sistema de fallas se encuentra al W de la falla Ixtlahuaca y parece estar asociado con la falla Perales, las fallas que se muestran en el mapa son inferidas, las cuales parecen tener una asociación directa con los ríos de la zona. En los puntos FI11, FI18, FI80, y FI100 se describieron estas fallas NW-SE que afectan en específico a las unidades San Lorenzo Toxico, flujos piroclásticos San Antonio Bonixi y domos Santuario (Figs. 5.8, 5.9 y 5.10).

Las fallas NW-SE son cortadas por el sistema de fallas Toxico (SFT) lo que sugiere que son fallas antiguas y algunas pudieron haber sido reactivadas durante la actividad de las fallas NE-SW. En la zona de San Jerónimo Ixtapantongo se observó a este sistema cortando a fallas del sistema de fallas de Ixtlahuaca (orientación E-W).



Figura 5.8 Fallas NW-SE en la zona de San Lorenzo Toxico. En figura de la izquierda se muestran a las fallas NW-SE que afectan a depósitos piroclásticos de la unidad San Lorenzo Toxico: círculo A depósito de caída de ceniza y círculo B flujo piroclástico. La imagen de la derecha muestra una fractura en los depósitos de caída de ceniza con orientación N50°W (punto de observación F118).

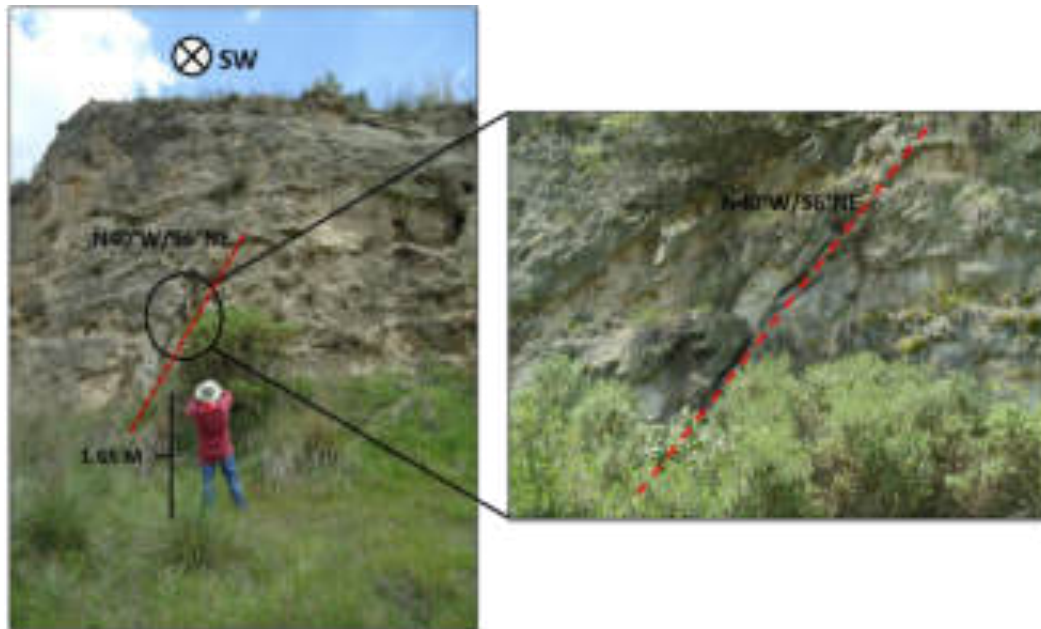


Figura 5.9 Fallas NW-SE entre San Lorenzo Toxico y San Antonio Bonixi. Se muestra una falla N40°W, 56°NE que corta a flujos piroclásticos de San Antonio Bonixi y es sobrecada por depósitos fluvio-lacustres (punto de observación F180).



Figura 5.10 Falla normal N38°W, 74°NE, afectando a las andesitas de los domos Santuario (punto de observación FI11).

5.3.1 Fallas San Jerónimo

En este trabajo se denomina fallas San Jerónimo a fallas que se localizan entre las poblaciones de Ixtlahuaca y San Lorenzo Toxico y tienen rumbos NW-SE y N-S. En el trabajo de Ortiz y Bocco (1989) reconocieron con base a su estudio morfoestructural estas fallas en lo que denominaron estrechamiento de Perales y que interpretaron como un horst.

Estas fallas cortan a la falla Ixtlahuaca y la desplazan con una componente lateral derecha (Fig. 5.11). Algunas de estas fallas San Jerónimo que tienen rumbo N-S están sepultadas por la unidad San Lorenzo Toxico, pero hay otras fallas que cortan a las unidades de San Lorenzo Toxico y flujos piroclásticos San Antonio Bonixi que tienen rumbos NW-SE. Estas relaciones sugieren que ha habido reactivación en esta zona. Las fallas parece que se comportaron en parte como una zona de relevo estructural de la falla Ixtlahuaca.



Figura 5.11 Sistema de fallas NW-SE que incluyen a la falla San Jerónimo y que se interpreta en este trabajo como una zona de relevo estructural antigua de la falla Ixtlahuaca que ha sido reactivada por el sistema de fallas Tóxica.

5.4 Sistema de fallas de la Sierra de las Cruces (SFSC)

El sistema de fallas de la Sierra de Las Cruces (SFSC) comprende fallas con orientaciones N-S, NE-SW y E-W que cortan a rocas volcánicas de estratovolcanes y domos volcánicos de la sierra Las Cruces (SC) (García-Palomo et al., 2008). En el sector norte de la SC y de acuerdo con los morfolineamientos de García-Palomo et al. (2008) predominan las fallas NE-SW y E-W en este sector; las fallas NE-SW las denominó zona de fallas La Catedral.

En esta investigación las fracturas y fallas que se encontraron en la zona de Jiquipilco y hacia las laderas en la parte poniente del cerro Los Lobos presentan rumbos generales de NE-SW, NW-SE y E-W. Las fallas son de tipo normales y con fracturas asociadas. Las fallas con orientaciones NE-SW son las que más abundaron en los datos de campo.

En este trabajo se propone el nombre de falla Jiquipilco para falla que se ubica en Jiquipilco y que aprovecha su traza de falla el arroyo La Prona. La longitud mínima de la falla es de 4 km (ver mapa geológico-estructural y punto de observación FI74); es una falla de tipo normal con una orientación que varía de N45°E-S45°W a N35°E-S35°W con echado de 50° al NW. Esta falla corta a los derrames andesíticos y flujos de autobrechas de la misma composición que pertenecen a la unidad andesítica Los Lobos de la SC (Fig. 5.12) y que en algunas partes pone en contacto a los derrames andesíticos Los Lobos con los flujos piroclásticos de Jiquipilco (Fig. 5.13).

En la zona de Jiquipilco se observaron otras fallas; la falla con actitud estructural de N80°E, 55°SE, la cual corta los derrames andesíticos de la SC y a los flujos piroclásticos de Jiquipilco (Fig. 5.14). Algunas fracturas se presentan cortando a la unidad de flujo piroclásticos Jiquipilco que tienen rumbos de N30°E-S30°W (punto de observación FI71). Hacia el sur de Jiquipilco en los flujos piroclásticos Portezuelo son cortados por fallas con actitud estructural de N70°W, 89°NW y N50°W, 87° NE (Fig. 5.15)

García-Palomo et al. (2008) sugiere una edad relativa a estas fallas en la sierra de Las Cruces (SC), considerando al sistema N-S como el sistema más antiguo seguido de las fallas normales NE-SW del Pleistoceno y terminando con las fallas E-W; las fallas E-W las relaciona con el sistema de fallas de Tula-Mixhuca y que se caracteriza por ser fallas de longitudes cortas, con arreglos paralelos o en échelon, donde sobresale la falla Ixtlahuaca y la falla Otomí para este sistema de fallas no menciona ninguna edad.

En este trabajo, para el sector de Jiquipilco, y con base en relaciones de corte, se considera que las fallas más antiguas fueron las fallas NW-SE y las E-W (falla Ixtlahuaca) y estas fallas fueron cortadas por las fallas NE-SW (como por ejemplo la falla Jiquipilco). Las fallas NW-SE se consideran más antiguas que ca. 3.7 Ma (Plioceno) ya que las fallas E-W y las fallas NE-SW predominan en el sector de Jiquipilco en la SC y además cortan a rocas andesíticas del volcán La Catedral y del cerro Los Lobos. Estos datos soportan que la falla Jiquipilco de orientación NE-SW es de edad Plio-Cuaternario.



Figura 5.12 En la foto se muestra zona de falla Jiquipilco y una falla con actitud estructural S35°W, 50°NW que corta a los derrames andesíticos Los Lobos de la SC.



Figura 5.13 Rocas volcánicas en la zona de daño de la falla Jiquipilco. Flujos de autobrechas andesíticas en imagen del lado izquierdo. En la imagen del lado derecho se muestra flujos de autobrechas andesíticas (A) que son sobreyacidos por flujos piroclásticos de Jiquipilco (B).



Figura 5.14 Falla al NE-SW que corta los derrames de lava andesítica Los Lobos, se muestra acercamiento en la imagen derecha.



Figura 5.15 En la parte sur de la población de Jiquipilco, flujos piroclásticos Portezuelo cortado por fallas E-W y NW-SE. El flujo piroclástico presenta pómez y clastos de andesitas en una matriz de ceniza.

CAPÍTULO 6

Resultados: Controles Estructurales en la Hidrogeología de la Falla Ixtlahuaca

En este capítulo se describirán la relación de la falla Ixtlahuaca con las aguas superficiales y los acuíferos de Ixtlahuaca-Atzacomulco (AIA) y del Valle de Toluca (AVT).

6.1 Hidrogeología general del área de estudio

La falla Ixtlahuaca es una frontera aparente entre el Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco (AIA) y el Acuífero del valle de Toluca (AVT). Esteller y Díaz (2000) menciona que como límite norte del AVT se encuentra la Guadalupeana, el cerro El Águila (dentro de la unidad domos Santuario) y la Sierra Monte Alto, y el Valle de Ixtlahuaca-Atzacomulco (una parte de la unidad San Lorenzo Toxico), que definen un límite abierto ya que existe una conexión hidráulica entre los dos valles.

El mapa esquemático hidrogeológico (Fig. 6.1 y anexo 7) muestra la interpretación de las unidades geológicas desde el enfoque hidrogeológico, donde se clasificaron las unidades dependiendo el tipo de medio geológico, en poroso y fracturado, además se agruparon las unidades que actúan como un acuitardo.

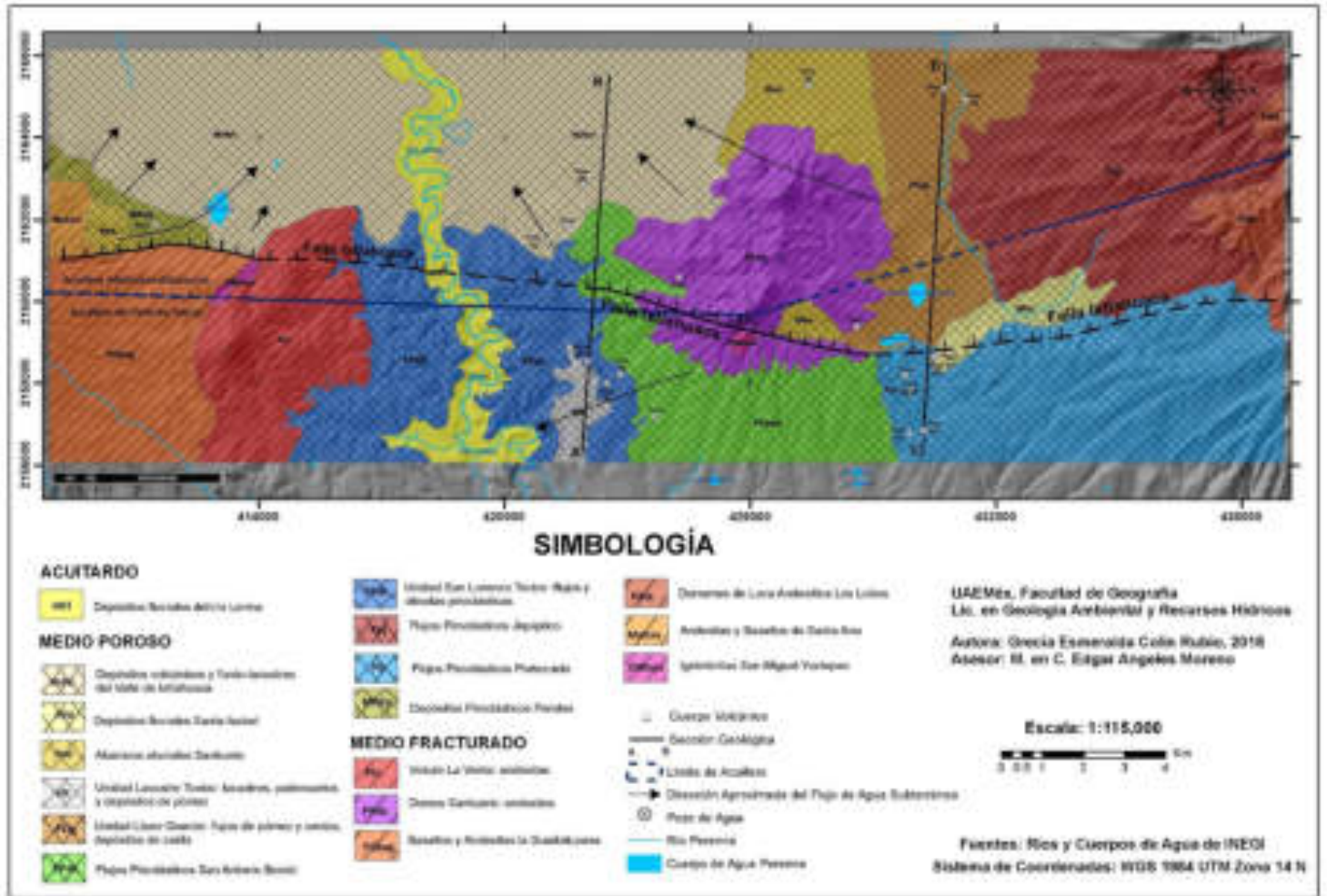


Figura 6.1 Mapa esquemático hidrogeológico.

6.1.1 Medio geológico poroso

Las unidades geológicas que se interpretaron como porosas son las que corresponden a tener una granulometría que podría comportarse como medios porosos, estas unidades son las de los depósitos piroclásticos Perales, flujos piroclásticos Jiquipilco, Portezuelo, San Antonio Bonixi, estas unidades podrían presentar permeabilidades medias - altas debido a los diferentes estratos de pómez, bloques de diferentes tamaños y poca presencia de ceniza en algunos afloramientos.

La unidad Llano Grande, para este trabajo se considera con una permeabilidad baja-media, debido a la presencia de intercalaciones de ceniza y depósitos fluviales con limos en los depósitos de pómez y gravas.

Los depósitos fluviales Santa Isabel y depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca se consideran con una permeabilidad media, por la cantidad de gravas, arenas gruesas, flujos con clastos de andesitas, pómez y ceniza.

Las unidades Lacustre Toxico, San Lorenzo Toxico y Abanicos aluviales para este trabajo se consideran como un medio poroso, pero de baja permeabilidad, por la presencia de intercalaciones de cenizas volcánicas, limos y arcillas.

6.1.2 Medio geológico fracturado

CONAGUA, (2015) menciona que el AIA está rodeado por rocas volcánicas lávicas y tienen el mayor potencial hidrogeológico del acuífero actuando como zonas de recarga.

Las unidades asignadas al medio fracturado son las Ignimbritas San Miguel Yuxtepec, Basaltos y Andesitas Santa Ana y La Guadalupana, Volcán La Venta y Domos Santuario, estos por la presencia de porosidad secundaria debido a fallas, fracturas y algunas intersecciones de estas, se infiere que tienen una permeabilidad alta y directa.

6.1.3 Acuitardo

Los acuitardos son las rocas que almacenan agua y la transmiten lentamente (Alfaro et al., 2006) un ejemplo representativo de estas rocas son las arcillas o las rocas compactas con pocos fracturamientos.

Los depósitos fluviales del Río Lerma actúan como un acuitardo por las interestratificaciones de ceniza volcánica en los depósitos de arenas gravas y algunos limos.

6.2 Dominios de patrones de drenaje superficiales en la falla Ixtlahuaca

En este trabajo se estudiaron las geometrías de las corrientes superficiales adyacentes y dentro de la falla Ixtlahuaca para determinar su relación con fracturas, se pudieron definir áreas o dominios en donde se observan controles estructurales y litológicos. Esto está basado en aseveraciones de Niemeyer-Rubilar (1999) en donde menciona que las fallas jóvenes a veces son marcadas y denotadas por ríos, debido a que el fracturamiento que acompaña a una falla facilita la erosión y transcurso de agua, por lo tanto, muchos ríos tienden a seguir su trazo.

Ortiz y Bocco (1989) ya había encontrado para la zona de Ixtlahuaca que existen correlaciones positivas entre la densidad de fracturas y los patrones geométricos del drenaje superficial, y por lo anterior concluyeron en parte que las direcciones de los patrones fluviales están gobernados por la densidad de fracturamiento y los accidentes tectónicos. También en el estudio de García-Palomo et al., (2008), encuentra que en la zona centro de la SC hay una alta densidad de corrientes superficiales donde la red de drenaje parece estar controlada por fallas o fracturas.

En la zona de la comunidad de Ixtlahuaca los ríos tenían una antigua dirección hacia el oeste y que debido al basculamiento hacia el sur de los bloques de rocas afectados por la falla Ixtlahuaca, la dirección del curso del drenaje cambió en ese mismo sentido formando un drenaje curvado (García-Palomo et al., 2008).

La geometría de las corrientes superficiales de la zona de estudio de la falla Ixtlahuaca fue estudiada desde el punto de vista geológico-estructural y se encontraron patrones muy bien definidos a los cuales se le llamaron dominios o áreas de patrones de drenaje superficial.

En este trabajo se muestra que existe una geometría en el flujo superficial relacionada con las fallas y fracturas, donde una gran mayoría de los ríos se pueden identificar como lineales o rectos. Los patrones de drenaje en el área de estudio fueron obtenidos con el registro de estos a partir de la cartografía base topográfica y luego se realizó la interpretación de lineamientos que tienen un control directo en

el patrón de dirección de los ríos, tanto en el bloque del bajo como en el del alto de la falla (Fig. 6.2 y anexo 8).

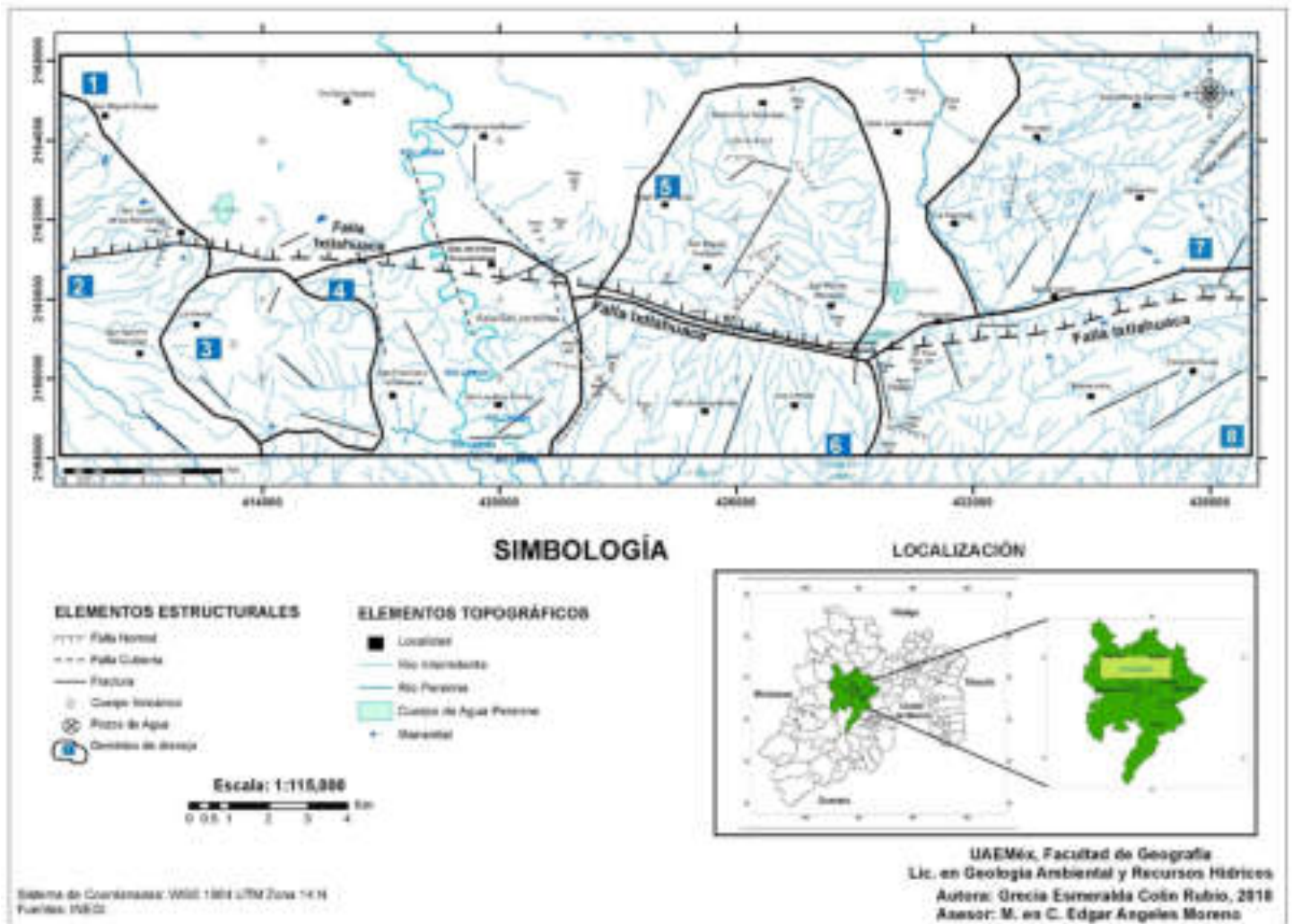


Figura 6.2 Mapa de dominios de patrones de drenaje superficial de la falla Ixtlahuaca.

Los dominios de drenaje superficial en la figura 6.2 y anexo 8, están enumerados para tener un control en su descripción y análisis esto según el patrón de drenaje. A continuación, se explica cada uno de ellos y sus relaciones con las fallas y fracturas.

Dominio de drenaje 1: En esta zona del Valle de Ixtlahuaca, se presentan pocos ríos, el más representativo de esta zona es el río Lerma, que se considera de tipo

meándrico y se desarrolla en las planicies. En esta zona del Valle de Ixtlahuaca no hay un control estructural en los ríos por los fracturamiento.

Este dominio de patrón de drenaje 1 corresponde con un medio hidrogeológico poroso y permeable de acuerdo con el mapa esquemático hidrogeológico. Y desde el punto de vista geológico en esta región también están depositados los sedimentos fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca. Estas condiciones geológicas, hidrogeológicas y estructurales sugieren que en las capas superiores de los depósitos volcanosedimentarios del valle de Ixtlahuaca no hay fracturas o fallas y reflejan una estabilidad estructural; las fallas del sistema NW-SE y fallas paralelas E-W en el bloque del bajo de la falla Ixtlahuaca están cubiertas y deben estar a mayor profundidad.

Dominio de drenaje 2: Las corrientes superficiales de agua en este dominio corresponden a los escurrimientos de agua perennes e intermitentes de las laderas del volcán La Guadalupana, pertenecen al patrón de drenaje radial, que Silva-Romo., et al., (2001) menciona que se desarrolla en estructuras volcánicas centrales. A la altura de San Juan de las Manzanas se observa en los arroyos un control lineal debido al escarpe de la falla Ixtlahuaca. Esta zona tiene fracturamientos hacia el NW, y se presentan en algunos ríos como se puede observar en el mapa de dominios de patrones de drenaje (Fig. 6.2 y en anexo 8).

Dominio de drenaje 3: Esta zona representa los flujos superficiales resultantes del volcán La Venta, para estos flujos se considera un patrón radial. También dentro de este dominio se presentan patrones de tipo paralelo, los cuales se desarrollan en presencia de una familia predominante de fracturas o de fallas paralelas (Silva-Romo., et al., 2001), se ubica una fractura NW, SE que de acuerdo con el tipo de patrón corresponde a la actividad de las fracturas de la zona. Los patrones paralelos parecen convergen hacia la zona centro del dominio y que sugieren que hay un control por una fractura con dirección N-S pero que no atraviesa a la falla Ixtlahuaca.

Dominio de drenaje 4: Este dominio se encuentra en planicies y lomeríos, el patrón de drenaje es dendrítico. La zona presenta diversos fallamientos y fracturamientos,

los cuales corresponden al sistema de fallas Toxico con orientación NE, SW y el sistema de falla NW-SE donde está la falla San Jerónimo propuesta en este trabajo, la presencia de los ríos en las fallas y fracturas, nos indica que en esta zona está controlada por los lineamientos de los sistemas de fallas de la falla Ixtlahuaca.

Dominio de drenaje 4: Desde el punto de vista geológico contiene a las unidades San Lorenzo Toxico y unidad lacustre Toxico y que son consideradas en este trabajo como medios acuitardo. En esta parte también se localizan los depósitos fluviales del río Lerma y que sigue su distribución a un valle con una dirección N-S en general. Estas propiedades geológicas, estructurales e hidrogeológicas sugieren que este es un paso de conexión hidráulico tanto a nivel de aguas superficiales y de agua subterránea ya que existen condiciones de fracturamiento e hidrogeológicas que se conjugan para que esto ocurra.

Dominio de drenaje 5: Esta zona pertenece a los domos Santuario, y los escurrimientos son de tipo radial y paralelo. Hacia el Sur de este dominio de drenaje se encuentra la falla Ixtlahuaca donde se ubica el patrón de drenaje paralelo en esa zona se presentan diversos fallamientos y fracturamientos por la actividad de la falla Ixtlahuaca (Fig. 6.2 y anexo 8). La orientación de estos patrones de drenaje refleja la presencia del sistema Toxico de fallas y fracturas NE-SW con la intersección de fracturas E-W de la falla Ixtlahuaca.

Dominio de drenaje 6: Los escurrimientos superficiales presentes en este dominio de drenaje, son ríos provenientes de la ladera sur de los domos Santuario, pero por su comportamiento rectilíneo y los antecedentes que existen de la falla Ixtlahuaca en cuanto a controles estructurales superficiales, se considera que pertenecen a un patrón de drenaje dendrítico y rectilíneo. Las fallas y fracturas que controlan parte de estos flujos superficiales son fallas NE-SW del sistema de fallas Toxico y en una parte al Oeste de este dominio la falla San Jerónimo tiene un control estructural en el río. El basculamiento y rotación del bloque del alto de la falla hacia el sur ya lo había descrito García Palomo et al., (2008), mencionando que los escurrimientos hacia el sur de la falla Ixtlahuaca (Bloque del alto), generaron el cambio de dirección de los escurrimientos hacia el sur en la zona. En este trabajo vemos que las

corrientes en este dominio 6 de patrones de drenaje se puede observar de igual manera este comportamiento.

Dominio de drenaje 7: Estos escurrimientos provienen de la Sierra de las Cruces, se identifican en el patrón de drenaje dendrítico. Las fallas y fracturas que actúan como controlador estructural de los ríos rectilíneos de la zona están orientadas al NE-SW y también E-W (Fig. 6.2 y anexo 8). Estas direcciones son controladas por fracturas NE-SW en los flujos piroclásticos y rocas volcánicas andesíticas, pero también hay un control litológico en las direcciones E-W debido al depósito de flujos piroclásticos Jiquipilco. El que se ha considerado una unidad hidrogeológica de medio poroso y permeable estos flujos piroclásticos implican que habrá manantiales que serán controlados por fracturas NE-SW y E-W y controles litológicos con direcciones E-W a su vez.

Dominio de drenaje 8: Los ríos presentes en esta zona son escurrimientos de la Sierra de las Cruces y a lo largo del rumbo de la falla Ixtlahuaca. El patrón de drenaje presente para la parte oeste de este dominio es el dendrítico y estos patrones son controlados por fracturas NE-SW por su comportamiento en patrones paralelos; y con menos frecuencia aparecen controles por fracturas NW-SE. En la traza de la falla Ixtlahuaca genera los patrones paralelos E-W siguiendo las fracturas y ríos de longitud larga por la base de escarpe de la falla esto se puede observar en el mapa de dominios de drenaje (Fig. 6.2 y anexo 8).

La presencia de arroyos en el escarpe de la falla con direcciones E-W y que se encuentra en un medio poroso y permeable como la unidad Portezuelo sugiere la presencia de manantiales que estarán controlados por esta dirección, pero también los patrones de drenaje NE-SW al intersectarse con patrones de fracturas E-W en este dominio pueden generar canales de flujo para formación de manantiales. Esto implica que la falla Ixtlahuaca es una discontinuidad estructural importante en la formación de manantiales.

6.3 Secciones geológicas transversales a la falla Ixtlahuaca: Controles estructurales subterráneos

La zona de la falla Ixtlahuaca en este trabajo contiene unidades hidroestratigráficas que han sido agrupadas en medios porosos, fracturados y acuitardos (Figura 6.1 y anexo 7), la propia falla es una unidad hidroestratigráfica considerada en este trabajo como un medio fracturado y con porosidad secundaria conforme a la geología de campo. Las unidades geológicas adyacentes a la falla se pueden considerar como un medio heterogéneo y anisotrópico de acuerdo con la idea de Alfaro et al. (2006), esto debido a las diferentes zonas de porosidad primaria y secundaria (porosos y fracturas) y algunas otras unidades definidas como acuitardos en este trabajo.

Para analizar el comportamiento del flujo de agua subterránea en la zona de estudio, se interpretaron dos secciones geológicas transversales a la falla que a continuación se explican.

La sección A-B está ubicada al centro de la zona de estudio (Mapa esquemático hidrogeológico, Fig. 6.1 y anexo 7), atraviesa diferentes unidades geológicas la Unidad San Lorenzo Toxico (Color Azul) que fue interpretada como un acuitardo y los Flujos piroclásticos San Antonio Bonixi (Color verde) como un medio poroso. La columna geológica de los pozos con clave 307 y 313 (Anexo 3) es congruente con las litologías registradas en campo.

Los datos de nivel estático de los pozos con clave 307 y 313 fueron tomados el 7 de diciembre del 2010, para el pozo con clave 307 el nivel estático estaba en 46.61 metros de profundidad y para el 313 el nivel estático corresponde a 42.08 metros de profundidad, estos datos fueron tomados con una sonda a 150 metros de profundidad y el nivel estático es referido al terreno (Tabla de información de pozos en anexo 2).

En la sección A-B se observa que se mantienen uniformes los niveles estáticos del agua, actuando como un medio heterogéneo y anisótropo, a pesar de la diversidad

de tamaños de granulometrías en las unidades de esta sección, parece ser que las fallas que están presentes no son límites sino conductos de flujos subterráneos de agua.

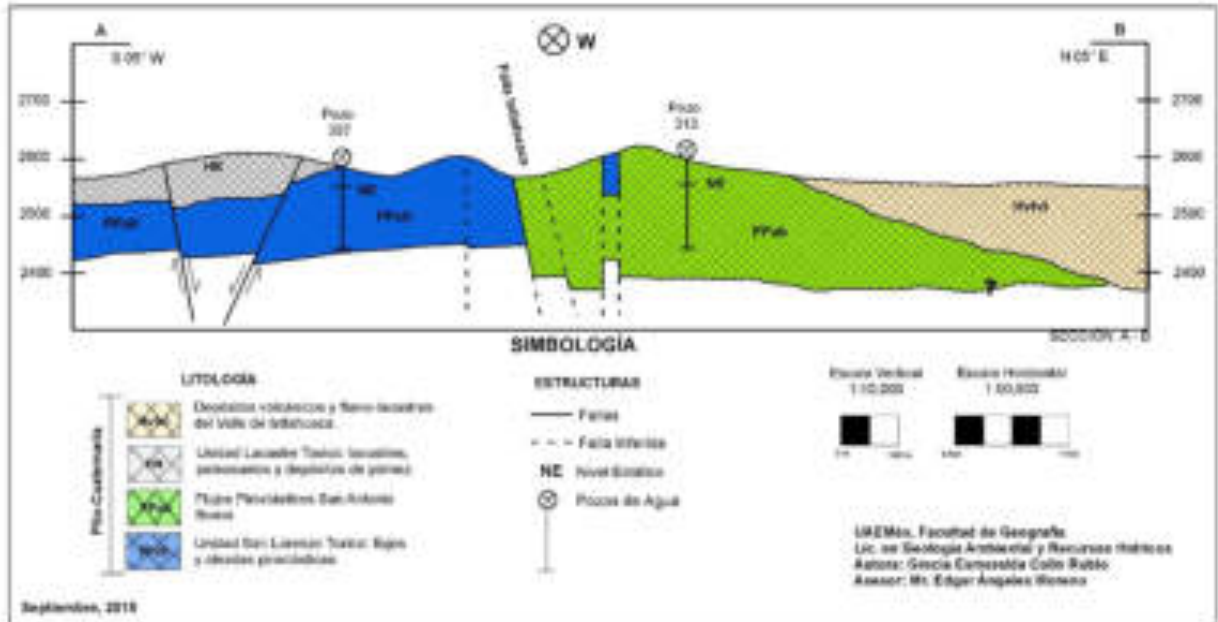


Figura 6.3 Sección geológica A – B. Muestra fracturas y nivel freático de pozos de agua.

La segunda sección geológica C-D fue ubicada hacia el este de los domos Santuario atravesando de norte a sur (Mapa esquemático hidrogeológico, Fig. 6.1 y anexo 7). Atraviesa dos unidades de medio poroso la unidad Llano Grande (Color café) y los flujos piroclásticos Portezuelo (Color azul), la falla Ixtlahuaca está en el límite de ambas donde fue cubierta por el depósito de ambas unidades; en la zona donde están los pozos con clave 110 y 111 de acuerdo con el corte litológico (Anexo 3) se presenta una litología de los 150 a 250 metros de profundidad que correlacionándolo a la zona de la SC podrían ser coladas de lava andesítica cubiertas por los flujos piroclásticos Llano Grande.

Los niveles estáticos entre los pozos varían, en el pozo con clave 58 DDF es a los 112.4 metros de profundidad, mientras que en los pozos con clave 110 y 111 fue tomado el dato de nivel estático del año 1969, para el primero presento un nivel estático brotante y un nivel dinámico de 66.70 y el segundo a los 9.6 metros de profundidad (Anexo 2). Los pozos con clave 110 y 111 pudiesen ser alimentados

por la recarga directa de la SC, con flujos locales y diferentes, en este caso los flujos de agua irían con una orientación E-W.

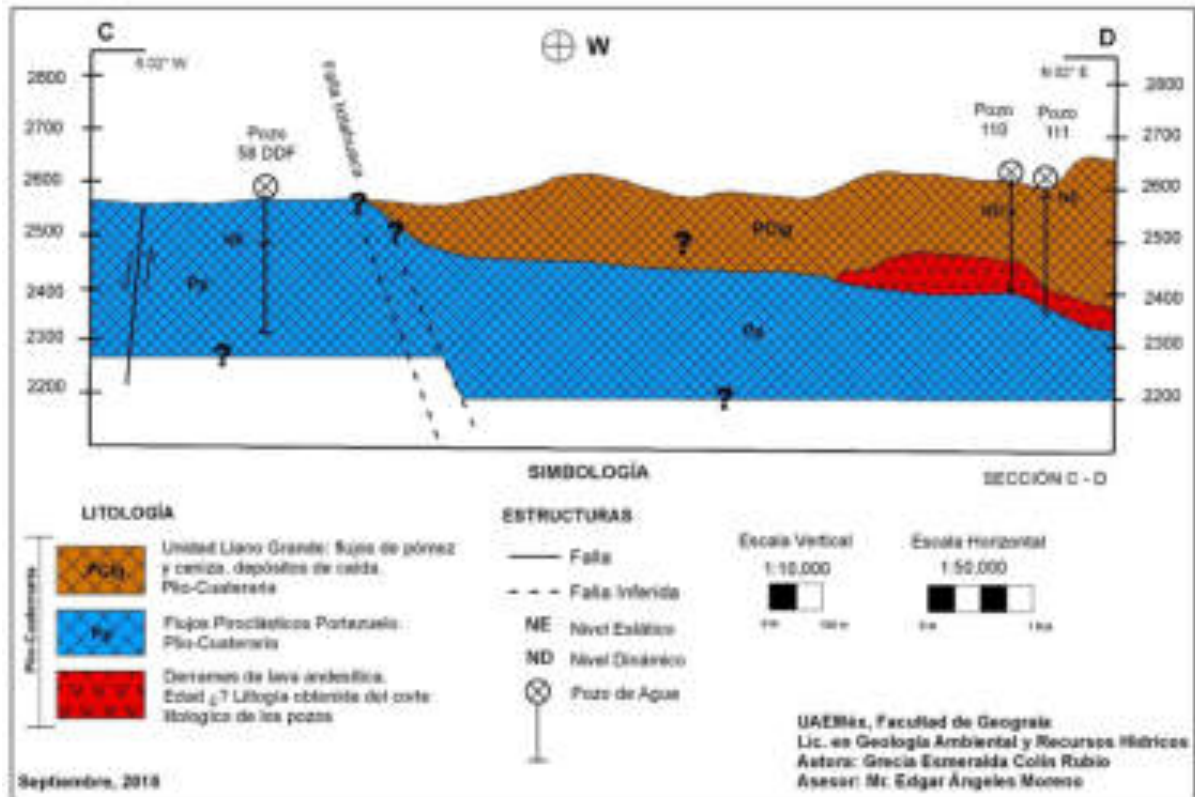


Figura 6.4 Sección geológica C – D. Muestra fracturas y nivel freático de pozos de agua.

Los resultados encontrados en la sección C-D muestran que la falla Ixtlahuaca y los domos volcánicos Santuario tienen una relación directa con la falla Ixtlahuaca, los domos Santuario parecen ser una zona de recarga (Porosidad secundaria) hacia ambos acuíferos (AVT y AIA), lo anterior por la gran cantidad de fallas y fracturas en los domos principalmente la falla Ixtlahuaca. Además los pozos de la sección C-D parecen ser que son alimentados por flujos diferentes de orientaciones de E-W.

El análisis de las secciones geológicas de este trabajo y estudios existentes del Acuífero del Valle de Toluca (AVT) (CONAGUA 2015; Expósito, 2012) y Acuífero del Valle de Ixtlahuaca (AVI) (CONAGUA, 2015) sugieren que la falla Ixtlahuaca tiene dos comportamientos hidráulicos: como frontera hidráulica y el otro en donde

no parece ser frontera hidráulica. En relación con la sección geológica A-B se muestra que, en la zona de San Jerónimo Ixtapantongo-San Lorenzo Toxico y por dónde va el curso del río Lerma, existe una conexión hidráulica con dirección de sur a norte dado por las propiedades estratigráficas donde Esteller y Díaz (2000) hacen mención que es un límite abierto con una conexión hidráulica entre el Valle de Toluca con el de Ixtlahuaca. La falla Ixtlahuaca según su comportamiento parece tener una relación entre ambos acuíferos (AVT Y AIA), actuando como parteaguas de estos de manera que se comporta como una frontera hidráulica entre los acuíferos, las fracturas presentes favorecen el flujo de agua subterránea en ambos lados de la falla, además de que ha creado zonas lineales (fallas y facturas) con una potencia de porosidad secundaria.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

Este trabajo de tesis permitió definir la geología general de la falla Ixtlahuaca en unidades geológicas informales que van en edades del Oligoceno al Cuaternario.

Con este trabajo también se pudo observar que la falla Ixtlahuaca (FI) está cubierta en su zona centro por la Unidad San Lorenzo Toxico y al Este por los Flujos Piroclásticos Portezuelo y Jiquipilco, pertenecientes a la actividad de la Sierra de las Cruces.

Se definieron varios sistemas de fallas y fracturas como la falla Ixtlahuaca (E-W), sistema de fallas Toxico (NE-SW), falla San Jerónimo (NW-SE) y otras fallas N-S. Entre estas fallas definidas las más importantes fueron las fallas con orientaciones de la falla Ixtlahuaca (E-W) afectando a las Ignimbritas San Miguel Yuxtepec.

Se definió a la falla Jiquipilco, ubicada al noreste de la cabecera municipal de Jiquipilco, es probable que la falla tenga mayor longitud fuera de la zona de estudio de este trabajo.

Se llegó a la conclusión de que los diferentes sistemas de fallas establecidos para este trabajo, en su mayoría, presentan una correspondencia y relación con los ríos de la zona (análisis de patrones de drenaje). Esto demuestra un control geológico-estructural con los ríos dentro de la falla Ixtlahuaca y en las zonas adyacentes a esta.

El análisis integrativo de estratigrafía, geología estructural, hidrogeología y secciones geológicas soportadas con pozos de agua subterránea, permitió encontrar que la falla Ixtlahuaca es una frontera hidráulica en su mayor parte a lo largo de su traza E-W para los acuíferos AVT y AIA; sin embargo en el área de San Lorenzo Toxico y San Jerónimo Ixtapantongo se encontró que la falla no es una barrera hidráulica, ya que el flujo se canaliza por un medio poroso y permeable con base en la estratigrafía, que además conecta a ambos acuíferos siendo un zona de

conexión hidráulica. Además la falla Ixtlahuaca y sus diferentes sistemas de fallas que se presentan en este trabajo han favorecido al flujo de aguas subterráneas en ambos lados de la falla.

La unidad definida informalmente como domos Santuario presentan gran fracturamiento, podría ser una buena zona de recarga hacia ambos acuíferos.

De acuerdo con los resultados de este trabajo se recomienda realizar fechamientos en las unidades representativas que ha cortado la falla como en las Ignimbritas San Miguel Yuxtepec y así definir la edad del primer pulso de fallamiento.

Por último se recomienda realizar las isolíneas de piezometría en la zona de la falla y en futuros estudios proponer medidas de protección en zonas de recarga y extracción de agua para la zona de contacto entre ambos acuíferos (AVT-AIA).

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., Rendón-Marquéz, G., 2006, La Caldera de La Catedral, Sierra de Las Cruces, una caldera al norponiente de la Ciudad de México (resumen), en Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Puerto Vallarta, Jal.: Geos, 26, P. 215.
- Alaniz-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A.F., 2005, 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, Volumen Conmemorativo del Centenario, 57(1). P. 65-82.
- Alfaro, P. E. M., Santos, P. M., & Castaño, S. C., 2006, Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros S. A. P. 284.
- Anguita, F., Verma, S. P., García-Cacho, L., Milán, M., & Samaniego, M. D., 1991, Mazahua: una nueva caldera en el Cinturón Volcánico Mexicano. Geofísica Internacional. Volumen 30,3. P. 135-148.
- Barnes, W., Lisle, J., 2004, Basic Geological Mapping (4th edition), 190 pp, Wiley, England.
- Bense, V.F., 2004, The hydraulic properties of faults in unconsolidated sediments and their impact on groundwater flow a study in the Roer Valley Rift System and adjacent areas in the Lower Rhine Embayment, University of Amsterdam. P. 19-33.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., Gámez-González, F.J., 2005, Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm 1. P. 1-18.

-Carrillo-Rivera, J.J., 2000, Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico: Hydrogeology Journal, 8, 503-520.

-Compton, R., R. 1985, Geology in the field, John Wiley and Sons. P. 398.

-CONAGUA., 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. P. 11-15.

-CONAGUA., 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixtlahuaca-Atlahcomulco (1502), Estado de México: Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. P. 5-6.

-Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y. R., 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. Volumen 34, 3. P. 250-279.

-Davis, G., Reynolds, S., 1984, Structural geology of rocks and regions, (2nd edition), 790 pp, John Wiley & Sons, Inc, USA

-Dávila, J., 2011, diccionario Geológico, GEOSS ASOCIADOS S.A.

-De Jesús-García, A., 2018, Actividad Geológica de la Falla Perales y sus Peligros Geológicos asociados en la región de Ixtlahuaca. Tesis de Licenciatura. Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México.

-Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, 2(2), 172-187.

- Denyer, P., 2014, Cartografiado Geológico de Costa Rica en la Revista Geológica de América Central: Universidad de Costa Rica

- Díaz-Delgado, C., Esteller, M. V., López-Vera F., 2005, Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica: Universidad Autónoma del Estado de México.

- Díaz, J. A., 2012, Metodología de la Investigación Geofísica. La Habana. P. 317.

- Esteller, M. V., & Díaz-Delgado, C. 2000, Calidad y Contaminación del Acuífero Profundo del Valle De Toluca, Edo de México. México. P. 21.

- Expósito, J., 2012, Características hidrodinámicas e hidroquímicas del Acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea. Tesis doctoral. Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México. P. 207.

- García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, r., Macías, J. J., 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25 (1). P. 158 – 178.

- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2005, Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, 57 (3). P. 227-283.

- Guerra-Peña, F., 2013, Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Número 50. P. 42-66.

- Guerra-Peña, F., 1980, Fotogeología, UNAM. Número 50. P. 337.

- Gutiérrez, A., 2005, Guía Teórica de Fotogeología: Universidad de los Andes, P. 42.

- Hernández-Bernal, M., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J., & Molina, J. 2016. Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico. *International Geology Review*. P. 24.

- IFOMEGEM, 1995, Carta Geológica del Estado de México: Gobierno del Estado de México.

- Israde-Alcantara, Miller, W. E., Garduño-Monroy, Barrón, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., 2010, Palaeoenvironmental significance of diatom and vertebrate fossils from Late Cenozoic tectonic basins in west-central México: A review. *Quaternary International* 219. P. 79–94.

- Johnson, C.A., Harrison, C.G.A., 1990, Neotectonics in central Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interior*.

- Ley de Aguas Nacionales, 2014, Cámara de Diputados.

- Lugo J., 1989, Diccionario de términos geomorfológicos. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Martínez-Reyes, J. M., Nieto-Samaniego, Á. F., 1990, Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(1). P. 33-50.

-Mayo, L.A., Koonts, W., 2000, Fracture flow and groundwater compartmentalization in the Rollins Sandstone; Lower Mesaverde Group, Colorado, USA: Hydrogeology Journal, 8, 430-446.

-Moran-Zenteno., 1984, Geología de la República Mexicana: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Universidad Autónoma del Estado de México. P. 55.

-Niemeyer-Rubilar, H., 1999, Apuntes de Geología Estructural, Primera Parte: Estructuras Frágiles. P. 142.

-Ortíz, M. A., Bocco, G., 1989, Análisis Morfotectónico de las depresiones de Ixtlahuaca y Toluca, México: Geofísica Internacional, 28 (3). P. 507-530.

-Osete, M.L., Ruiz-Martínez, V.C., Caballero, C., Galindo, C., Urrutia- Fucugauchi, J., Tarling, D.H., 2000, Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence: Tectonophysics, 318. P. 201-215.

-Padilla y Sánchez, R. J., 2013, Geología Estructural, (1^{ra} edición). Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. P. 232.

-Ramírez, M., 2015, Sobreexplotación del acuífero Ixtlahuaca - Atlacomulco, Estado de México. Análisis espacio-temporal (1970-2010). Tesis de licenciatura. Toluca, México. Universidad Autónoma del Estado de México. P. 91.

-Salinas-Sánchez., 2013, Geología, Petrología y Geoquímica del Volcán Jocotitlán, Estado de México. Tesis. UNAM. P 170.

-Sánchez-Rubio, G., 1984, Cenozoic volcanism in the Toluca-Amealco region, central Mexico. Tesis de Maestría, Imperial College of Science and Technology, University of London, RU, 275. P 275.

-Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C, C., Campos-Madrigal, E., 2001, Elementos de Cartografía Geológica. UNAM, Facultad de Ingeniería. P. 292.

-Singhal, B., y Gupta, R., 2010, Applied Hydrogeology of fractured Rocks. Springer Science & Business Media.P. 408.

-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, 32 (3). P. 361-376.

-Suter, M., Quintero, O., Johnson, C.A., 1992, Active faults and state of stress in the central part of the Mexican volcanic Belt, the Venta de Bravo fault: Journal of Geophysical Research, 97 (11), P. 983-994.

-UNAM., 2010, Apuntes de Fallas y Fracturas

-Yuni, J. A y Urbano, C. A., 2014, Técnicas para Investigar. Recursos Metodológicos para la Preparación de Proyectos de Investigación. Volumen 2. Editorial Brujas. Córdoba. P. 113.

ANEXOS

Anexo 1 Glosario.

Algunos conceptos que en esta investigación tomo como base son los siguientes:

Recursos Hídricos: Se refiere al agua superficial y subterránea que son adecuadas para el consumo humano, uso industrial y agrícola (Díaz-Delgado C., et al., 2005).

Acuífero: Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (Ley de Aguas Nacionales, 2014).

Deformación: Son los cambios estructurales que tienen lugar en la ubicación, orientación original, la forma y el volumen de un cuerpo de roca. Se refiere a los procesos físicos y químicos que producen los cambios estructurales (Davis et al., 1984).

Estructuras: Es la disposición, arreglo y cohesión de los materiales constituyentes de un determinado cuerpo rocoso (Dávila, 2011).

Estructuras Primarias: Son aquellas estructuras de las rocas que estaban presentes antes de la deformación, son resultado de depósito y emplazamiento (Padilla y Sánchez, 2013).

Estructuras Secundarias: Son estructuras asociadas a una estructura mayor y que son resultantes de una deformación o metamorfismo (Padilla y Sánchez, 2013).

Rumbo: Es la línea que resulta de la intersección de la superficie con un plano horizontal. El rumbo de una superficie plana se mide en el campo con una brújula en términos de cuadrantes (NE, NW, SE, SW), o en términos de azimuts (0° - 360°) (Padilla y Sánchez, 2013).

Echado: Es el ángulo de máxima pendiente entre el plano horizontal y la superficie (Padilla y Sánchez, 2013).

Falla Geológica: Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructural geológicas (Dávila, 2011).

Falla normal: Si el movimiento ocurre conforme a la línea de máxima pendiente, la falla es normal; el desplazamiento es tal que el bloque de techo se desliza hacia abajo con relación al bloque de piso.

Falla inversa: La falla es inversa cuando el movimiento ocurre en dirección de la línea de máxima pendiente y el bloque de techo se desliza hacia arriba con relación al bloque de piso.

Escarpes de falla: Se definen como laderas abruptas a desplome, donde la altura es variable y la génesis obedece a distintas causas (Lugo, 1989).

Fotogeología: Es la metodología que consiste en la interpretación de los sucesos geológicos en la superficie terrestre a escala macroscópica a través de fotografías aéreas para reconocer estructuras y algunos materiales (Gutiérrez, 2005).

Mapa Geológico: El mapa geológico no es un fin en sí mismo, como a veces podría mal entenderse, sino que es un instrumento para explicar la geología de un área, su historia geológica y los procesos de erosión y meteorización involucrados, así como los procesos tectónicos que han contribuido a deformar la región (Denyer, 2014).

Se considera que existen 4 tipos de mapa geológico según Barnes et al. (2004), que a continuación se describirán:

Mapa de reconocimiento: Es aquel mapa cuya escala es de 1: 250 000 o menor, generalmente se basan únicamente en sensores remotos y las corroboraciones de campo son muy pocas, por lo regular se obtienen datos generales de estructuras regionales.

Mapa regional: Muestra un mayor detalle geológico, se usan escalas 1: 50 000 o 1: 25 000, normalmente se usan herramientas de sensores remotos como fotos aéreas, DEMs, imágenes satelitales, con un amplio reconocimiento de unidades en el campo. Se requiere de puntos de observación cada kilómetro, sin embargo, esto es muy relativo, depende de: las vías de acceso, la diversidad de litologías, la distribución de las estructuras geológicas, el control geomorfológico de las unidades, las condiciones topográficas, la complejidad geológica o tectónica de algunas unidades específicas, y otros muchos factores que harán que los encargados del proyecto dediquen más o menos recorridos a ciertas zonas del mapa.

Requiere de un conocimiento y exposición de la columna estratigráfica, así como de las estructuras tectónicas principales. Se indican los datos de la inclinación y dirección estratigráfica de estratos, diques, etc. Normalmente se incluye un perfil geológico, que es un elemento que añade la tercera dimensión al mapa y que deja traslucir el modelo geológico del área.

Son mapas de tipo conceptual, donde lo más importante no es la exactitud de los contactos y las trazas de estructuras, sino que las relaciones espaciales de las unidades correspondan con la columna estratigráfica y que las estructuras muestren un concepto estructural regional.

Este tipo de mapas son muy útiles para ser utilizados por los tomadores de decisiones acerca de la ubicación de proyectos, así como la planificación del uso

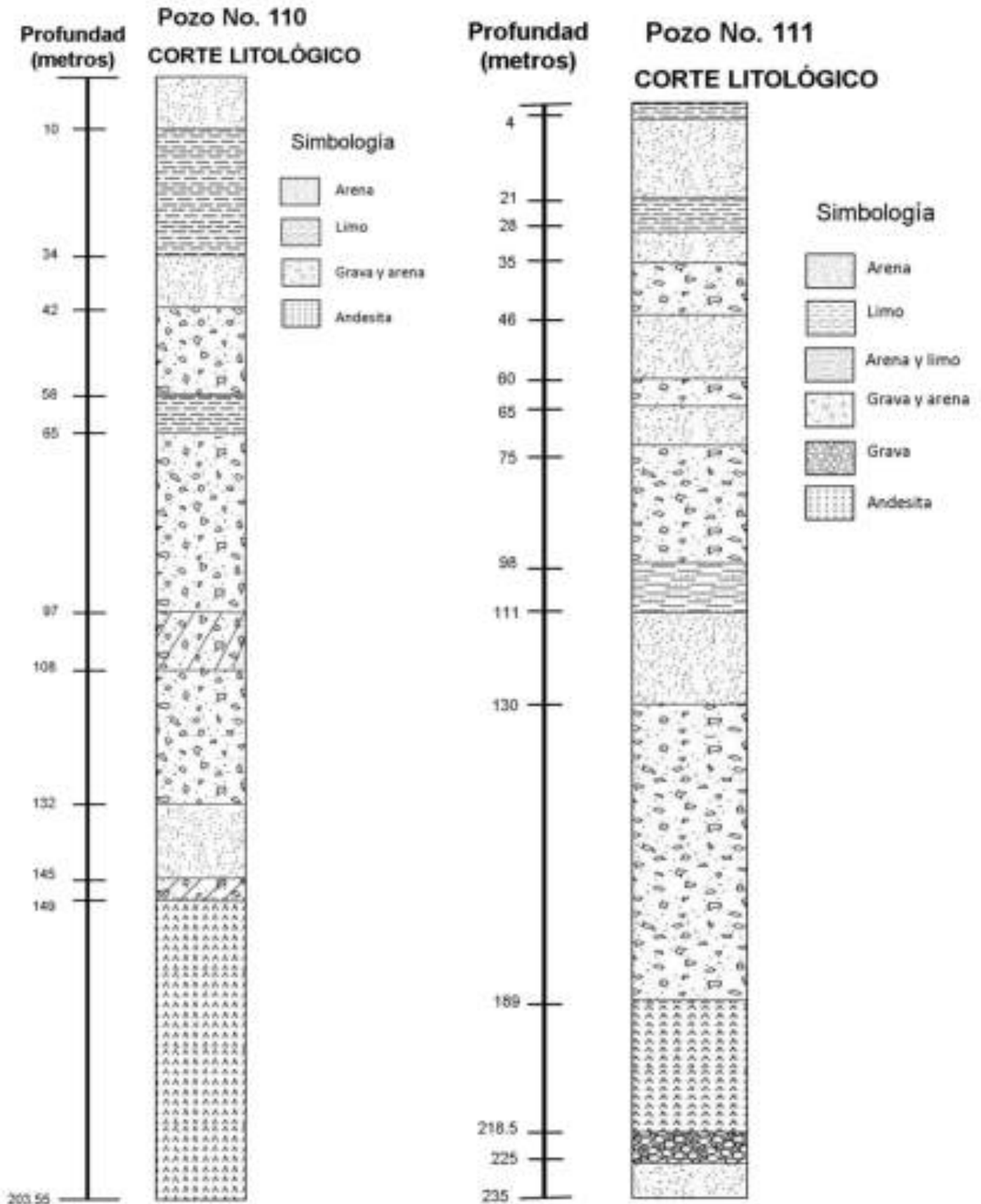
del terreno. Son la base para la elaboración de mapas más detallados o específicos, los cuales normalmente mantienen las relaciones estratigráficas y las estructuras regionales.

Mapa detallado: Son mapas realizados en investigaciones específicas, sean de tipo científico o tecnológico, generalmente a escalas de 1: 10 000 o mayores. Muy comunes en el estudio de mineralizaciones, represas hidroeléctricas, o cualquier proyecto ingenieril.

Mapa especializado: Son de características muy variadas, tanto para investigación como con propósitos económicos, generalmente su escala varía entre 1:10 000 y 1: 2500, aunque pueden ser de mayor escala. Pueden ser mapas de gran escala de pequeñas áreas para dilucidar el comportamiento de estructuras geológicas, planos de minas subterráneas, con escalas mayores a 1: 1500. Hay muchos otros tipos de mapas con afiliación geológica como sería el caso de mapas de levantamientos geofísicos o geoquímicos. Actualmente están acompañados de una base de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), lo que hace a estos mapas muy versátiles y que da la posibilidad de sobreponerlos a los datos de geología convencional, para hacer interpretaciones y correlaciones espaciales de los datos.

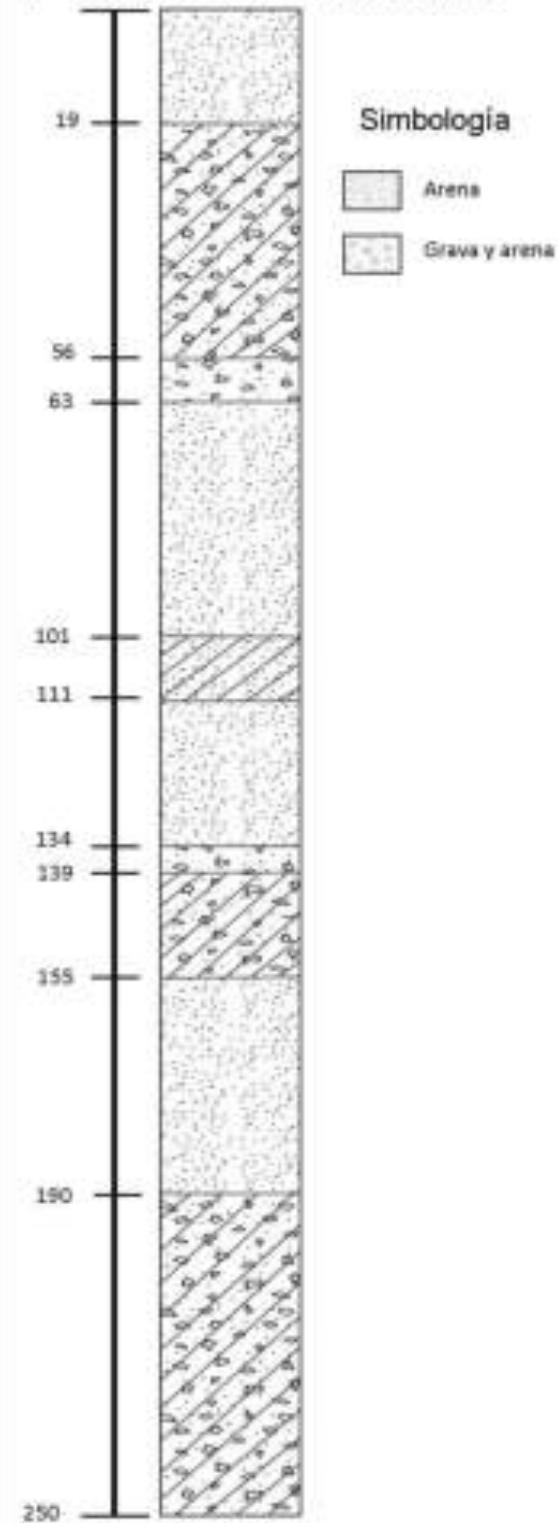
Anexo 2 Pozos de agua localizados en las secciones geológicas realizadas.

Clave del Pozo	Región	Sub-Región	x	y	z	Municipio	Nivel Estático	Nivel Dinámico	Sección Geológica
307	Lerma	Alzate	422162	2158671	2567	Ixtlahuaca	46.61 (Dato de diciembre de 2010)	Sin dato conseguido	A-B
313	Sin dato conseguido	Sin dato conseguido	421059.87	2161482	2549	Ixtlahuaca	42.08 (Dato de diciembre de 2010)	Sin dato conseguido	A-B
58DDF	Lerma	Alzate	429,900	2,157,800	2539.4	Jiquipilco	112.4 (Dato del 1995)	Sin dato conseguido	C-D
110	Lerma	Lerma Norte	431230	2164892	2552	Jiquipilco	Nivel brotante (Dato de 1969)	66.7	C-D
111	Lerma	Lerma Norte	430764	2165266	2553	Jiquipilco	9.6 (Dato de 1969)	Sin dato conseguido	C-D

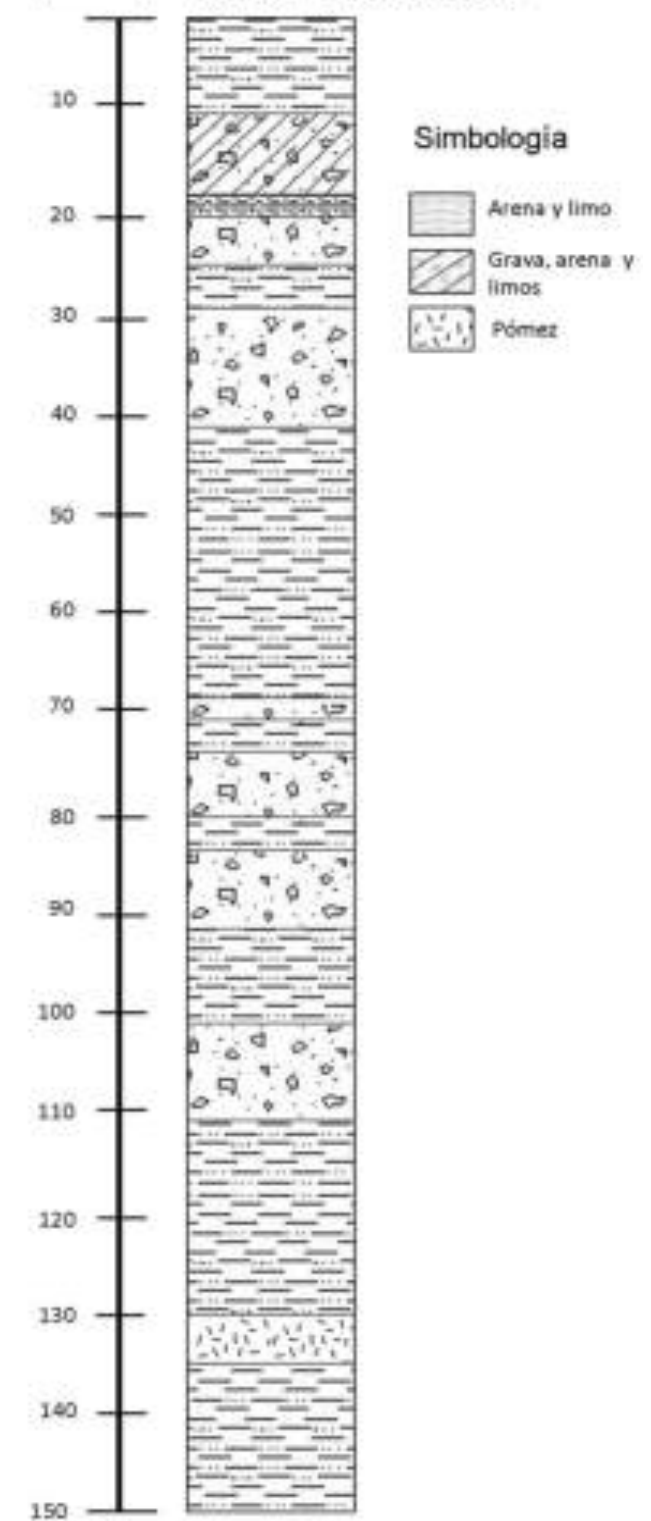


Anexo 3 Columnas estratigráficas de los pozos localizados en el área de estudio.

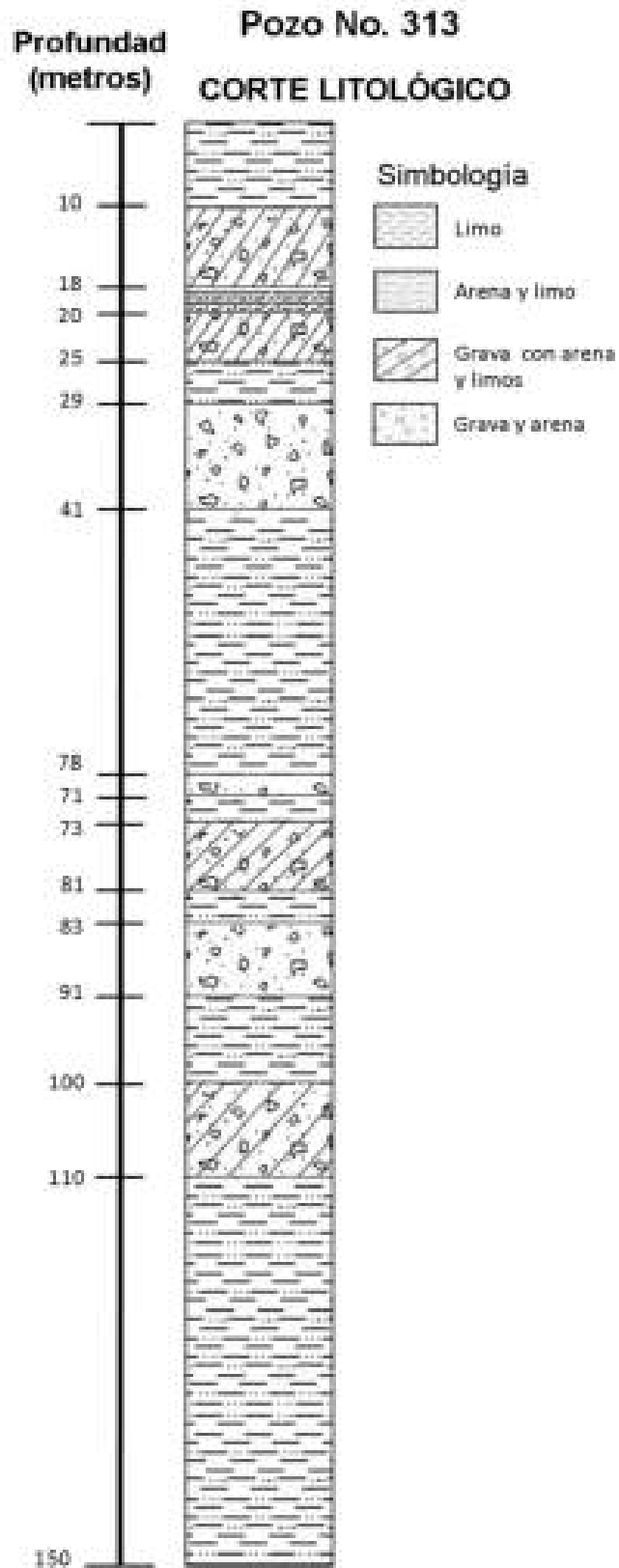
Pozo No. 58 DDF
CORTE LITOLÓGICO



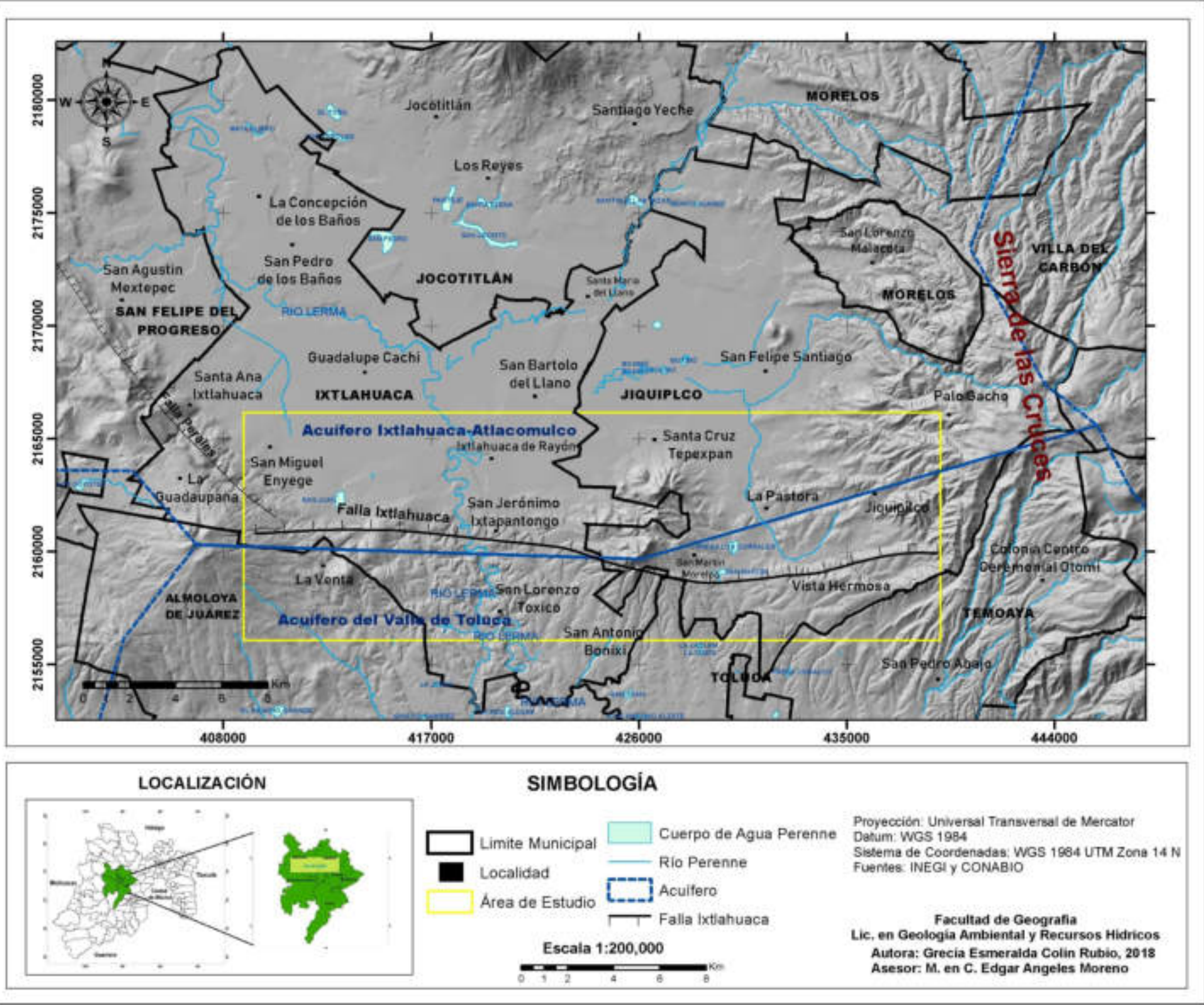
Pozo No. 307
CORTE LITOLÓGICO



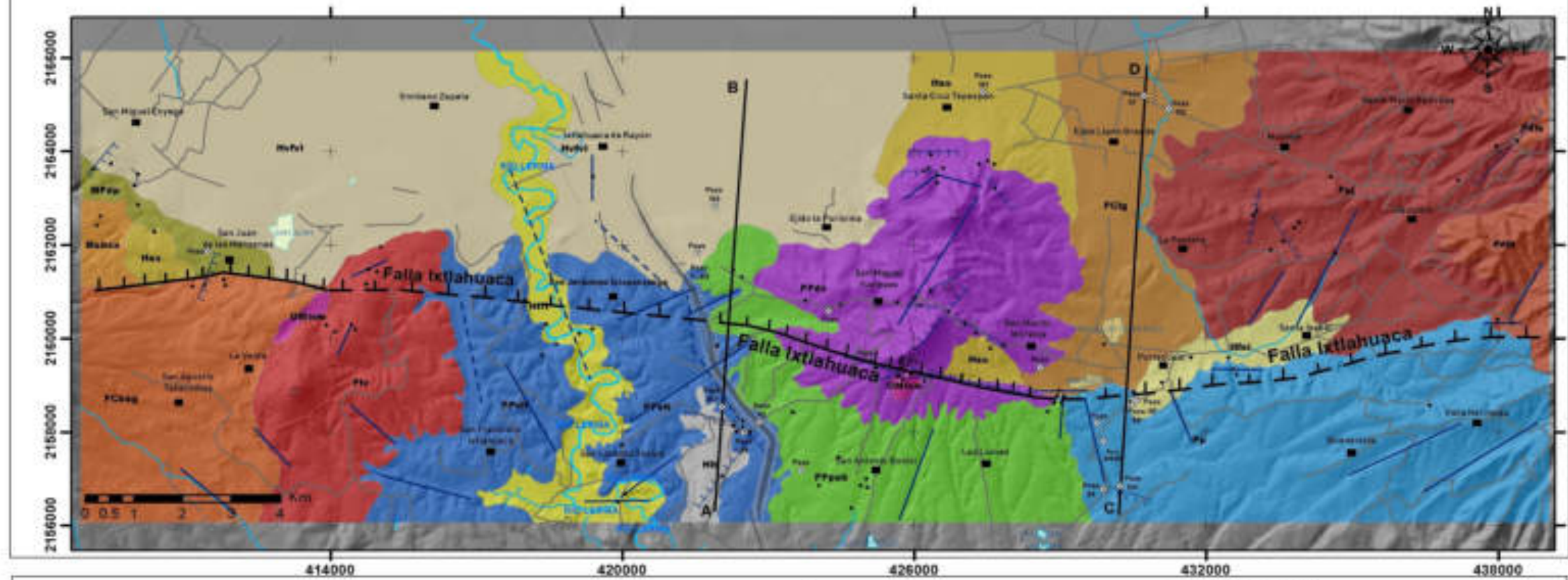
Anexo 3 Columnas estratigráficas de los pozos localizados en el área de estudio.



Anexo 3 Columnas estratigráficas de los pozos localizados en el área de estudio.



Anexo 4 Mapa de ubicación del área de estudio.



SIMBOLOGÍA

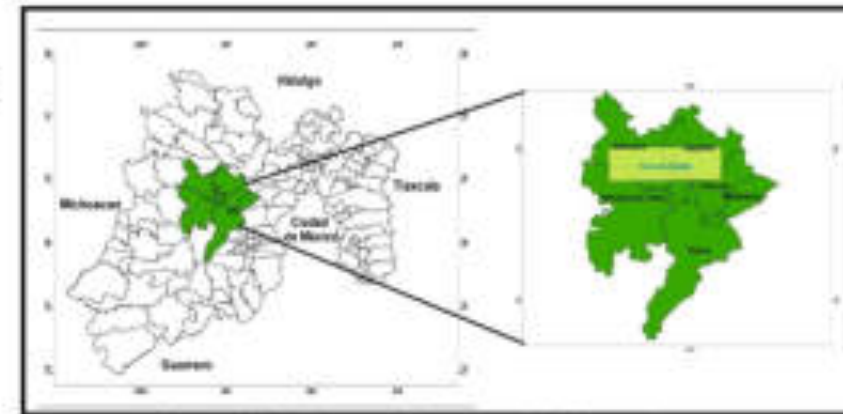
LITOLOGÍA		ELEMENTOS ESTRUCTURALES	
HN1	Depósitos fluviales del río Lerma	TTTT	Falla Normal
HV1	Depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca	- - -	Falla Cubierta
HV2	Depósitos fluviales Santa Isabel	—	Fractura
HAS	Abanicos aluviales Santuario	□	Cuerpo Volcánico
HL	Unidad Lacustre Toxicó: lacustres, paleosuelos y depósitos de pómez	—	Contacto Geológico
PLA	Volcán La Venta: andesitas	●	Puntos de Estaciones de Observación Geológica
PLG	Unidad Llano Grande: flujos de pómez y ceniza, depósitos de caída	⊗	Pozos de Agua
PPAS	Flujos Piroclásticos San Antonio Bonixi	—	Sección Geológica
PPAS	Domos Santuario: andesitas	A	
PPAL	Unidad San Lorenzo Toxicó: flujos y oleadas piroclásticas	B	
PCAS	Basaltos y Andesitas la Guadalupeana		
PLA	Flujos Piroclásticos Jiquipilco		
PLA	Flujos Piroclásticos Portezuelo		
PLA	Derrames de Lava Andesítica Los Lobos		
MAAS	Andesitas y Basaltos de Santa Ana		
MPAS	Depósitos Piroclásticos Perales		
OMAS	Ignimbritas San Miguel Yuxtepec		

Plio-Cuaternaria
Oligoceno-Mioceno

ELEMENTOS TOPOGRÁFICOS

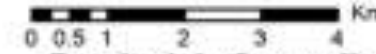
■	Localidad
—	Autopista
—	Carretera
—	Río Perenne
—	Cuerpo de Agua Perenne

LOCALIZACIÓN



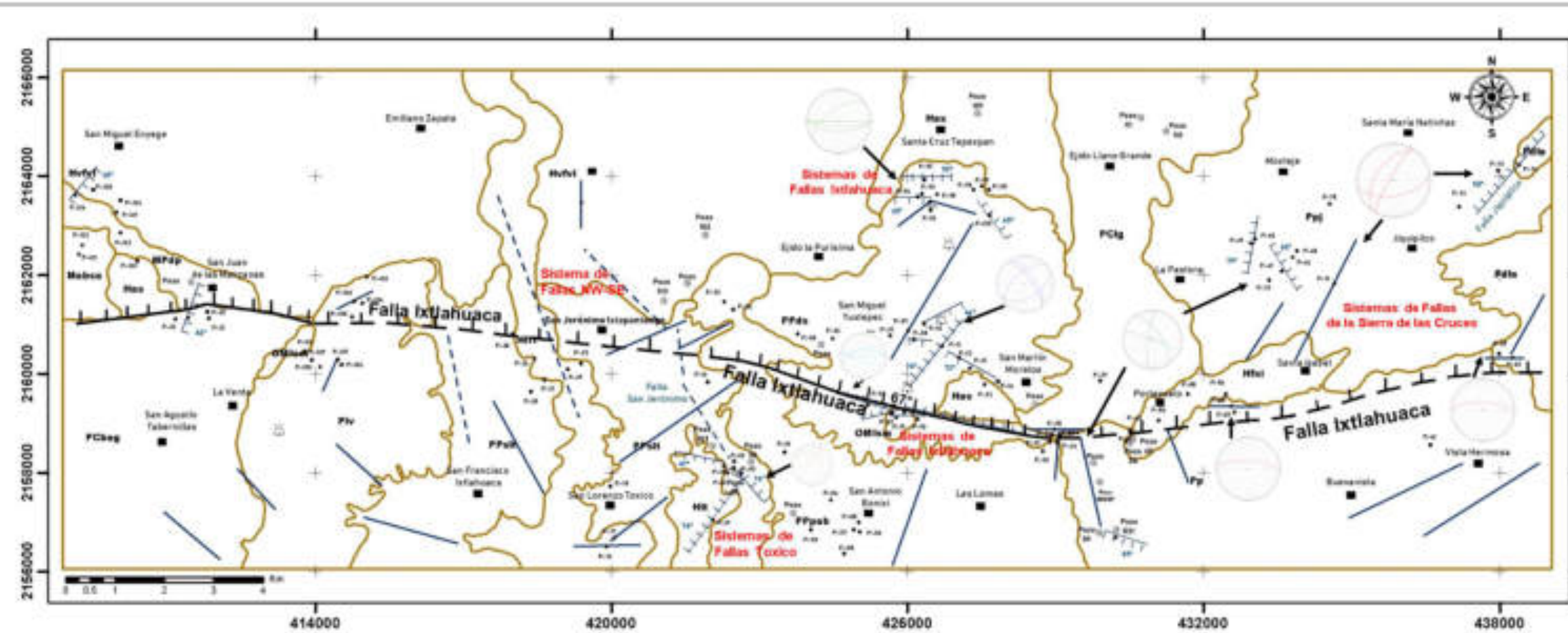
Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS 1984
 Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 14 N
 Fuentes: Cartas Topográficas INEGI
 E14A27, E14A28, E14A37 y E14A38
 Datos municipales y estatales de CONABIO.

Escala: 1:115,000



Facultad de Geografía
 Lic. en Geología Ambiental y Recursos Hídricos
 Autora: Grecia Esmeralda Colin Rubio, 2018
 Asesor: M. en C. Edgar Angeles Moreno

Anexo 5 Mapa Geológico.



SIMBOLOGÍA

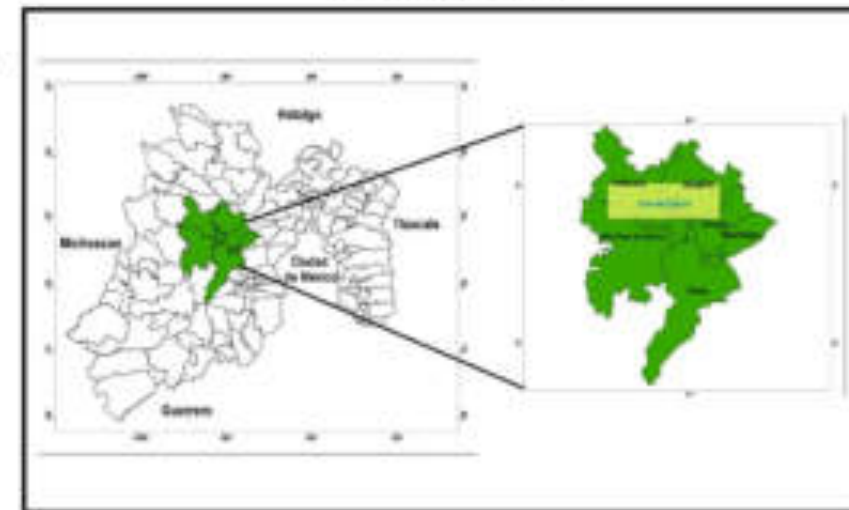
LITOLOGÍA		ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
Plio-Cuaternaria	HW1	Depósitos fluviales del río Lerma	— — — —	Falla Normal
	HWV1	Depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca	- - - -	Falla Cubierta
	HWV	Depósitos fluviales Santa Isabel	—	Fractura
	HW	Abanicos aluviales Santuario	○	Cuerpo Volcánico
	WR	Unidad Lacustre Toxico: lacustres, paleosuelos y depósitos de pómez	○	Contacto Geológico
	PRV	Volcán La Venta: andesitas	●	Puntos de Estaciones de Observación Geológica
	PClg	Unidad Llano Grande: flujos de pómez y ceniza, depósitos de caída	⊙	Pozos de Agua
	PPab	Flujos Piroclásticos San Antonio Bonixi	■	Localidad
	PPds	Domos Santuario: andesitas	○	Redes Estereográficas
	PPvs	Unidad San Lorenzo Toxico: flujos y oleadas piroclásticas		
	PClsg	Basaltos y Andesitas la Guadalupeana		
	Py1	Flujos Piroclásticos Jiquipilco		
	Py	Flujos Piroclásticos Portezuelo		
	Pds	Derrames de Lava Andesítica Los Lobos		
	Oligoceno-Mioceno	Mh1-4	Andesitas y Basaltos de Santa Ana	
MPds		Depósitos Piroclásticos Perales		
OMs		Ignimbritas San Miguel Yuxtepec		

Escala: 1:115,000

0 0.5 1 2 3 4 Km

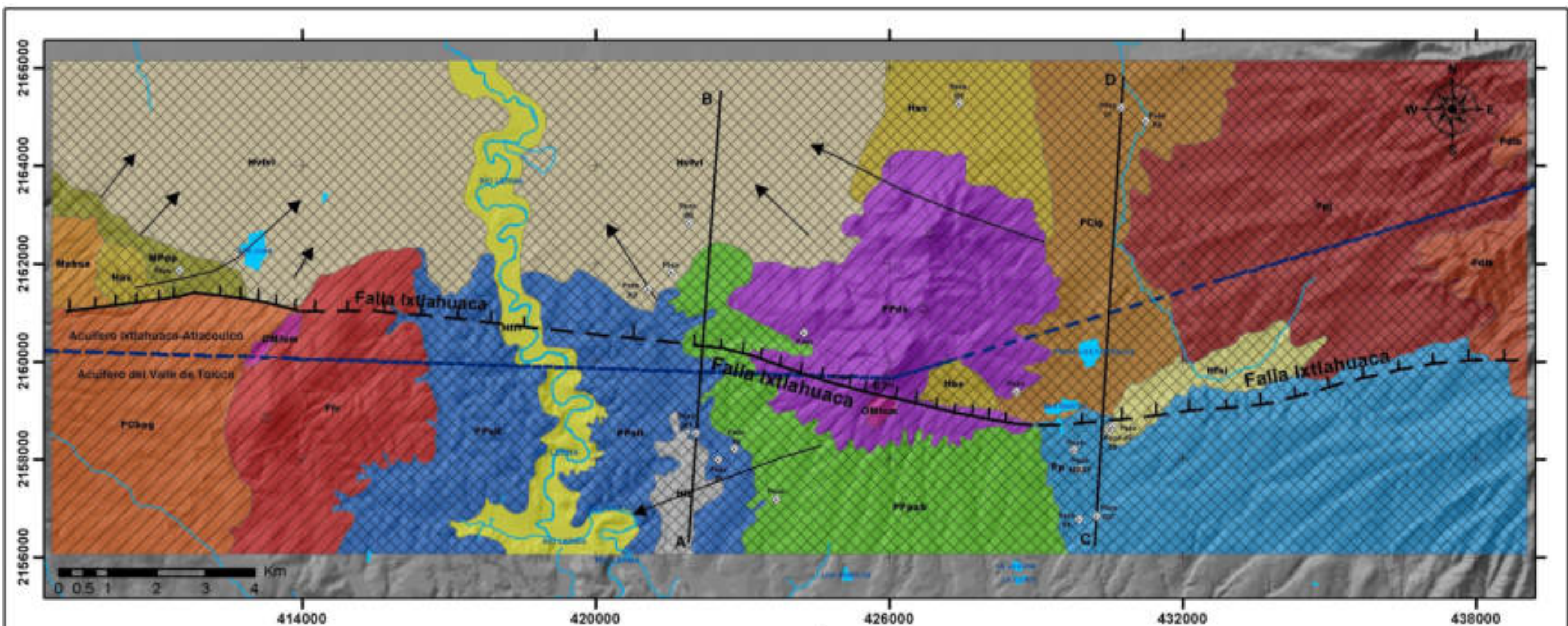
Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 14 N
Fuentes: Localidades INEGI.

LOCALIZACIÓN



UAEMéx, Facultad de Geografía
Lic. en Geología Ambiental y Recursos Hídricos
Autora: Grecia Esmeralda Colin Rubio, 2018
Asesor: M. en C. Edgar Angeles Moreno

Anexo 6 Mapa Geológico – Estructural.



SIMBOLOGÍA

ACUITARDO

Hfri Depósitos fluviales del río Lerma

MEDIO POROSO

Hvfn Depósitos volcánicos y fluvio-lacustres del Valle de Ixtlahuaca

Hfu Depósitos fluviales Santa Isabel

Hsa Abanicos aluviales Santuario

Hlt Unidad Lacustre Toxico: lacustres, paleosuelos y depósitos de pómez

PClg Unidad Llano Grande: flujos de pómez y ceniza, depósitos de caída

PPah Flujos Piroclásticos San Antonio Bonixi

PPsh Unidad San Lorenzo Toxico: flujos y oleadas piroclásticas

PPj Flujos Piroclásticos Jiquipilco

PPo Flujos Piroclásticos Portezuelo

PPdp Depósitos Piroclásticos Perales

MEDIO FRACTURADO

PLv Volcán La Venta: andesitas

PPds Domos Santuario: andesitas

PCbag Basaltos y Andesitas la Guadalupeana

PLla Derrames de Lava Andesítica Los Lobos

Mabsa Andesitas y Basaltos de Santa Ana

OMsan Ignimbritas San Miguel Yuxtepec

Cuerpo Volcánico

Sección Geológica

Límite de Acuífero

Dirección Aproximada del Flujo de Agua Subterránea

Pozo de Agua

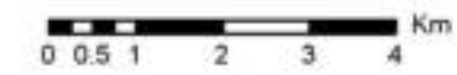
Río Perenne

Cuerpo de Agua Perenne

UAEMéx, Facultad de Geografía
Lic. en Geología Ambiental y Recursos Hídricos

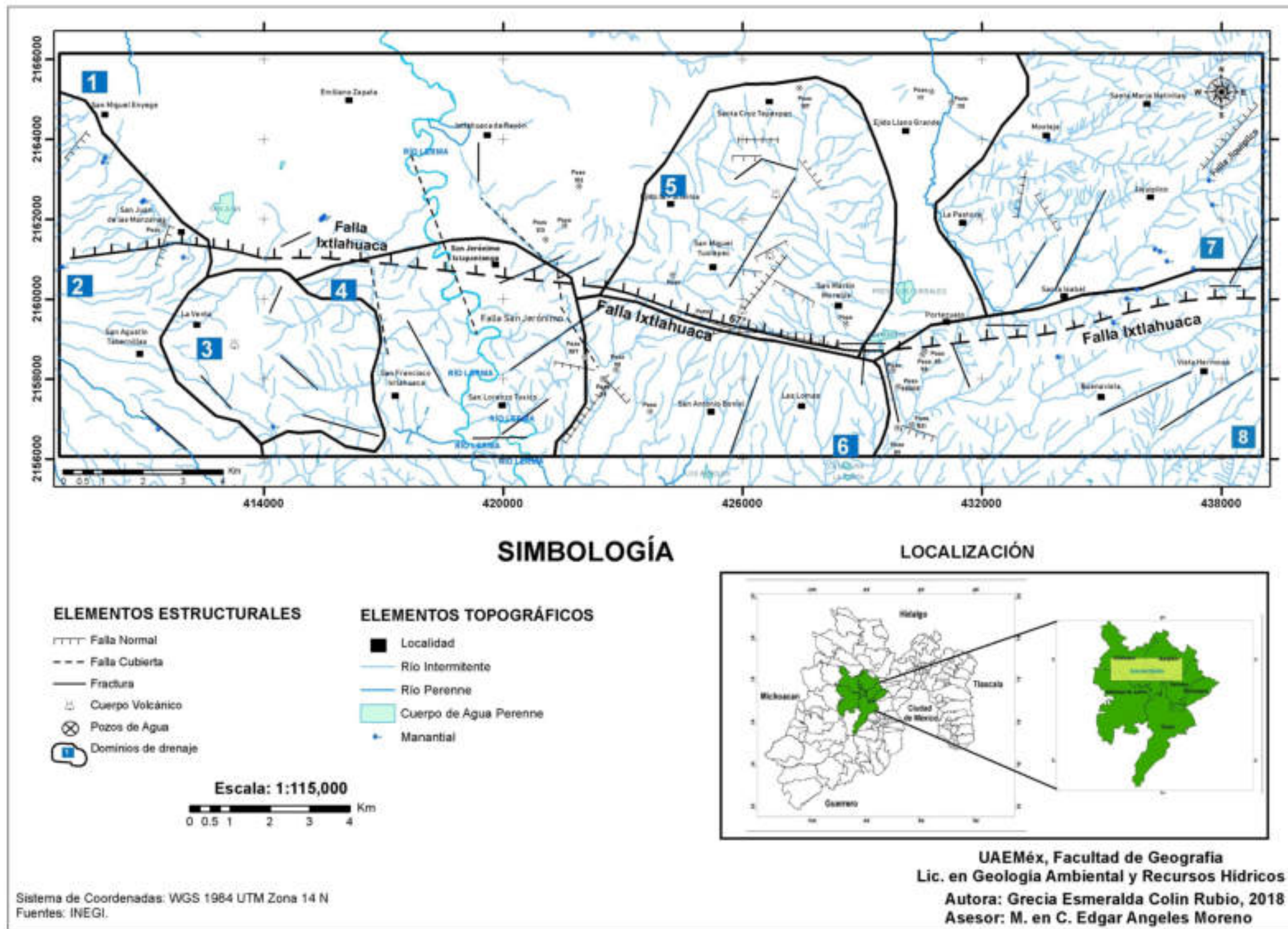
Autora: Grecia Esmeralda Colín Rubio, 2018
Asesor: M. en C. Edgar Angeles Moreno

Escala: 1:115,000

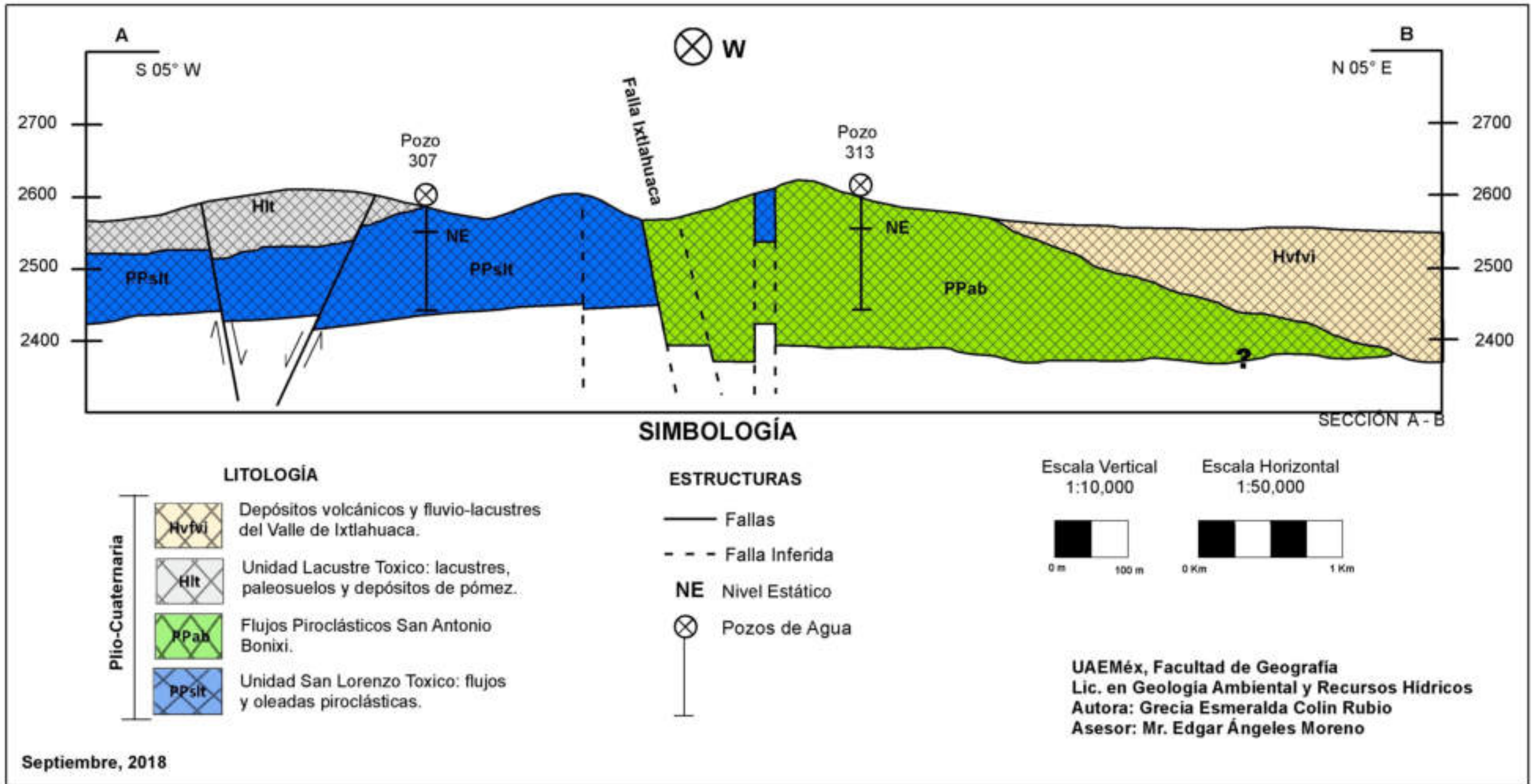


Fuentes: Ríos y Cuerpos de Agua de INEGI
Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 14 N

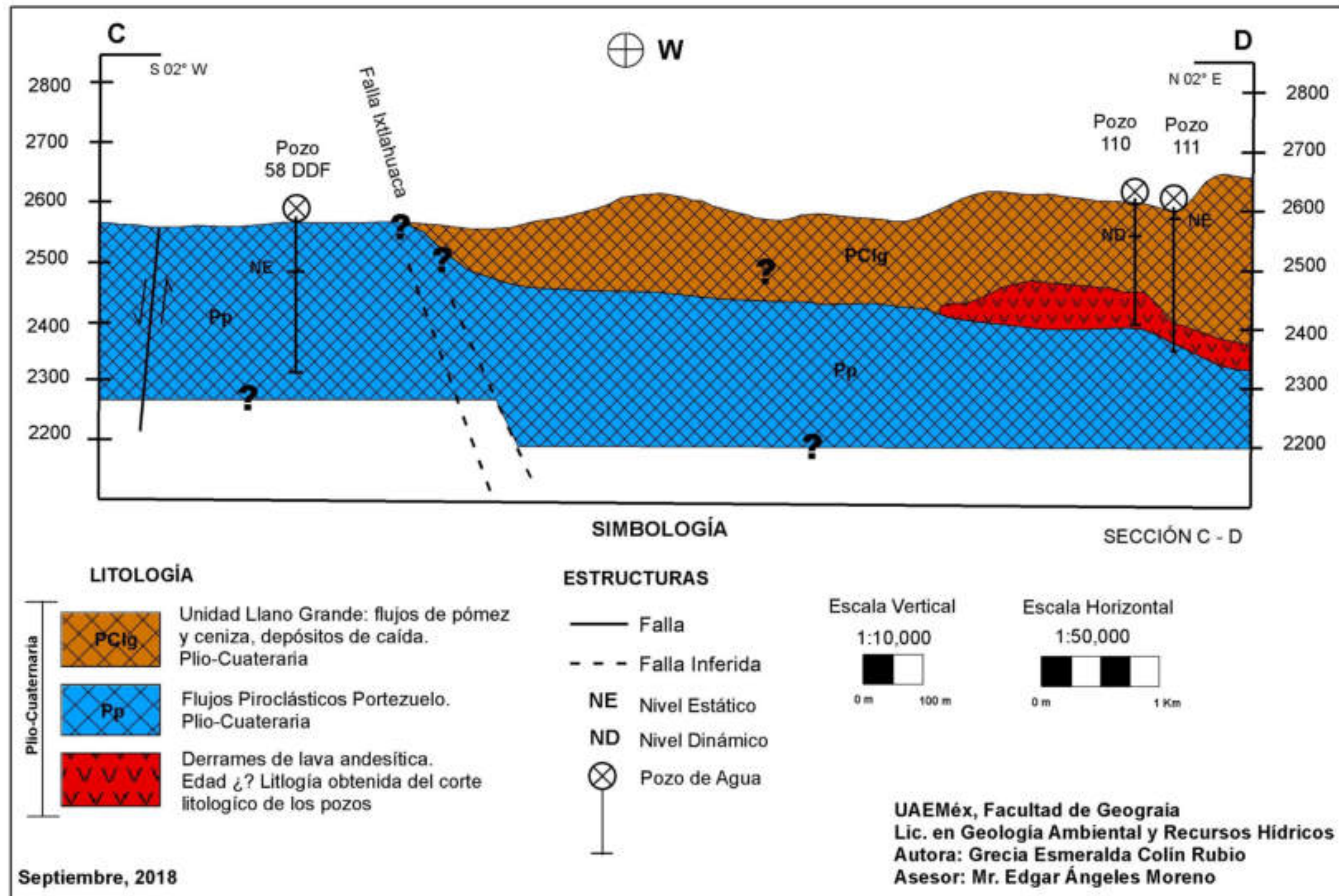
Anexo 7 Mapa esquemático hidrogeológico.



Anexo 8 Mapa de Dominios de Drenaje Superficial.



Anexo 9 Sección Geológica A-B.



Anexo 10 Sección Geológica C-D.