

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA



LICENCIATURA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

Cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca con énfasis en controles estructurales y su influencia en las características hidrogeológicas del área.

Tesis

PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

PRESENTA:

Marco Antonio López Montoya

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. en C. T. Edgar Ángeles Moreno

REVISORES:

Dr. en I. José Luis Expósito Castillo

Dr. en C. Héctor Víctor Cabadas Báez

RESUMEN

La ciudad de Toluca se encuentra en un activo desarrollo urbano horizontal y su crecimiento en infraestructura por ende va interactuando con su entorno geológico, este entorno geológico involucra a las estructuras volcánicas que le rodean como son Cerro de Coatepec, Cerro El Murciélagos, Cerro La Teresona, Cerro Las Canoas, Cerro Tencho, Cerro El Aire, Cerro El Perico, Cerro Agua Bendita, Cerro El Calvario, Cerro El Conejo y Cerro Molcayete. Esto obliga a establecer los peligros y riesgos geológicos que resultan de las interacciones geológico-ambientales así como la caracterización de las fracturas que se relacionan con algunas características hidrogeológicas de los volcanes cercanos a la ciudad de Toluca, así como el área que los rodea.

Este trabajo de investigación cumplió el objetivo de la elaboración de la cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca mediante el uso de metodologías de geología de gabinete y campo para reconocer posibles peligros geológicos relacionados a fallas geológicas y sus controles geológicos-estructurales en el acuífero de los alrededores.

En este trabajo se definió la estratigrafía y geología estructural de los volcanes de Toluca. Los resultados muestran que los volcanes son domos y conos cineríticos (conos piroclásticos) que tuvieron productos volcánicos como derrames lávicos andesíticos basálticos y andesíticos dacíticos así productos piroclásticos. Los resultados de geología estructural muestran las fracturas y fallas que se encuentran en el área del centro de Toluca en donde se encuentran fallas con direcciones NE-SW y NW-SE principalmente, existen lineamientos estructurales que sugieren la presencia de fallas ocultas por depósitos sedimentarios y volcánicos más recientes. Algunas de las fracturas identificadas controlan a cursos de corrientes superficiales y otras parecen controlar a manantiales mientras que otras fracturas a profundidad pueden controlar geometrías de acuíferos a escala local. La definición de una zona transicional entre los volcanes y las zonas fluvio-lacustres permite ver que muchas de las grietas y fallas relacionadas a subsidencia hídrica se forman en esa zona transicional entre los volcanes y las zonas fluvio-lacustres.

La integración y análisis de la cartografía de uso de suelo, pendientes, zona transicional, construcción de secciones geológicas y una geología estructural permitió definir algunos de los peligros y riesgos geológicos que se relacionan o se pueden relacionar en el futuro a los volcanes de Toluca como son: fallas geológicas, subsidencia por extracción de agua subterránea, sismicidad y deslizamientos.

ABSTRACT

The city of Toluca is in an active horizontal urban development and its growth in infrastructure is therefore interacting with its geological environment, this geological environment involves the volcanic structures that surround it such as Cerro de Coatepec, Cerro El Murcielago, Cerro La Teresona, Cerro Las Canoas, Cerro El Tencho, Cerro El Aire, Cerro El Perico, Cerro Agua Bendita, Cerro El Calvario, Cerro El Conejo and Cerro Molcajete. This forces us to establish the geological hazards and risks that result from the geological-environmental interactions as well as the characterization of the fractures that are related to some hydrogeological characteristics of the volcanoes near the city of Toluca, as well as the area that surrounds them.

This research work fulfilled the objective of the elaboration of the geological-environmental cartography of the volcanoes of the central zone of Toluca by means of the use of cabinet and field geology methodologies to recognize possible geological hazards related to geological faults and their geological controls structural effects in the surrounding aquifer.

In this work the stratigraphy and structural geology of the volcanoes of Toluca was defined. The results show that the volcanoes are domes and cineritic cones (pyroclastic cones) that had volcanic products such as andesitic-basaltic and andesitic-dacitic lava flows, as well as pyroclastic products. The results of structural geology show the fractures and faults found in the area of the area of downtown Toluca where faults are found with directions NE-SW and NW-SE mainly, there are structural guidelines that suggest the presence of hidden faults by sedimentary deposits and most recent volcanic. Some of the identified fractures control courses of surface currents and others seem to control springs while other Deep fractures can control local aquifer geometries. The definition of a transitional zone between the volcanoes and the fluvio-lacustrine zones allows us to see that many of the cracks and faults related to water subsidence are formed in the transitional zone between the volcanoes and the fluvio-lacustrine zone.

The integration and analysis of the cartography of land use, slopes, transitional zone, construction of geological sections and a structural geology allowed to define some of the dangers and geological risks that are related or can be related in the future to the volcanoes of Toluca as they are: geological faults, subsidence due to underground water extraction seismicity and landslides.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento y justificación del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodología.....	3
1.4 Localización del área de estudio.....	8
Capítulo 2. Marco Teórico.....	9
2.1 Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).....	9
2.2 Geología y geología ambiental.....	11
2.2.1 Antecedentes geológicos.....	11
2.2.1.1 Estratigrafía de la cuenca del Valle de Toluca.....	11
2.2.1.2 Geología estructural de la cuenca del Valle de Toluca.....	12
2.2.1.3 Geología del área de estudio.....	14
2.2.2 Antecedentes geológico-ambientales.....	15
2.2.2.1 Conceptualización general de geología ambiental.....	15
2.2.2.2 Antecedentes geológico-ambientales.....	17
2.2.3 Antecedentes hidrológicos.....	25
2.2.3.1 Hidrogeológica general.....	25
2.2.3.2 Antecedentes hidrogeológicos del área de estudio.....	27
Capítulo 3. Geología ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca.	31
3.1 Estratigrafía.....	31
3.1.1 Flujos piroclásticos San Antonio Acahualco (CFaa-FPa).....	36
3.1.2 Depósitos fluvio-lacustres Santa Juana (CDsj-FL).....	37
3.1.3 Cerró El Calvario (CCc-AB).....	38
3.1.4 Domos San Marcos Yachihuacaltepec (CDmy-AD).....	39
3.1.5 Complejo de domos Santiago Miltepec (CDsm-AD).....	41
3.1.6 Domo la Teresona (CDt-A).....	47
3.1.7 Domos las Canoas (CDc-DA).....	52
3.1.8 Complejo volcánico Sierra Morelos (CUt).....	54
3.1.9 Volcán El Aire (CVa-AD).....	58

3.1.10 Volcán Cerro del Murciélago (CVcm-DPab).....	58
3.1.11 Volcán San Martín Toltepec (CVmt).....	59
3.1.12 Volcán San Luis Mextepec (CVIm).....	60
3.1.13 Volcán El Perico (CVp).....	62
3.1.14 Volcán El Molcajete (CVm).....	63
3.1.15 Depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuauhtenco y oleadas piro-clásticas San Lorenzo (CDlc-FL).....	65
3.1.16 Depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca (CDsvVT)....	69
3.2 Geología estructural.....	71
3.2.1 Fallas.....	73
3.2.2 Fracturas.....	77
3.3 Secciones geológicas.....	80
Capítulo 4. Características hidrológicas de los alrededores de los volcanes del área de estudio.....	84
4.1 Corrientes Superficiales.....	86
4.2 Tipos de acuíferos en el área de estudio.....	90
4.3 Multipiezómetros cercanos a los volcanes del área de estudio.....	90
4.4 Relación Hidrogeológica entre los volcanes y la cuenca que los rodea.....	92
4.5 Controles Estructurales y la influencia en las características hidrogeológicas del área.....	94
Capítulo 5. Características Geológico-Ambientales.....	96
5.1 Zona transicional entre volcanes y acuífero.....	96
5.2 Peligros y riesgos geológicos relacionados a fallas y fracturas.....	98
5.2.1 Identificación de zonas de deslizamiento de tierra.....	99
5.2.2 Relación de fallas y fracturas con la subsidencia por extracción de agua subterránea.....	111
5.3 Cartografía geológico-ambiental.....	115
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	116
Referencias.....	119
Anexos.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	<i>Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas en este trabajo y algunas actividades desarrolladas.....</i>	7
Figura 1.2	<i>Mapa de localización del área de estudio.....</i>	8
Figura 2.1	<i>Mapa de ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana.....</i>	9
Figura 2.2	<i>Mapa de fallas y fracturas en el Valle de Toluca.....</i>	13
Figura 2.3	<i>Localización del sismo de magnitud 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (color rojo) y algunos otros del mismo tipo en la región.....</i>	24
Figura 2.4	<i>Tipos de acuíferos.....</i>	26
Figura 2.5	<i>Mapa hidrogeológico del Acuífero del Valle de Toluca.....</i>	30
Figura 3.1	<i>Mapa geológico del área de estudio.....</i>	32
Figura 3.2	<i>Sección geológica A'-A''.....</i>	33
Figura 3.3	<i>Sección geológica B'-B''.....</i>	34
Figura 3.4	<i>Depósitos piroclásticos San Antonio Acahualco.....</i>	36
Figura 3.5	<i>Secuencia de unidades estratificadas en antigua mina.....</i>	37
Figura 3.6	<i>Secuencia de unidades estratificadas en corte de tiradero.....</i>	37
Figura 3.7	<i>Parte derecha de corte (visto en dirección N-S) que muestra fracturamiento.....</i>	38
Figura 3.8	<i>Parte izquierda del corte, se aprecia la dirección de flujo SE.....</i>	38
Figura 3.9	<i>Afloramiento de brecha volcánica que intrusionó a derrame volcánico.....</i>	39
Figura 3.10	<i>Fractura en flujo andesítico del lado derecho dirección NE-SW..</i>	39
Figura 3.11	<i>Fractura geológica que corta a brecha volcánica y flujos andesíticos.....</i>	39
Figura 3.12	<i>Fractura en corte geológico, se encuentra rellena de materiales de composición del dono.....</i>	39
Figura 3.13	<i>Lineamientos de flujo laminar.....</i>	40
Figura 3.14	<i>Autobrechamiento de andesitas vesiculosas con matriz vítrea...</i>	40
Figura 3.15	<i>Estructura de rompecabezas presentes en clastos dentro de flujos de lava-dome.....</i>	40

Figura 3.16	<i>Flujo andesítico con presencia de fractura, figura 1 de 3 de secuencia estratigráfica.....</i>	42
Figura 3.17	<i>Brecha volcánica, figura 2 de 3 de secuencia estratigráfica.....</i>	42
Figura 3.18	<i>Flujo piroclástico, figura 3 de 3 de secuencia estratigráfica.....</i>	42
Figura 3.19	<i>Flujo andesítico con presencia de fractura estructural.....</i>	42
Figura 3.20	<i>Flujo andesítico.....</i>	43
Figura 3.21	<i>Flujo piroclástico con clastos de andesita y matriz de ceniza volcánica.....</i>	43
Figura 3.22	<i>Corte geológico muestra capa interior de brecha volcánica a la cual se sobrepone el flujo andesítico, figura 1 de 4.....</i>	43
Figura 3.23	<i>Corte geológico muestra capa de flujo andesítico, figura 2 de 4.....</i>	43
Figura 3.24	<i>Corte geológico parte brecha volcánica a la cual continua flujo andesítico, figura 3 de 4.....</i>	43
Figura 3.25	<i>Corte geológico de flujo andesítico, presenta fractura e hidrotermalismo figura 4 de 4.....</i>	43
Figura 3.26	<i>Muestra de ceniza soldada que rellena fractura que se muestra en la figura 3.25.....</i>	44
Figura 3.27	<i>Brecha de falla en flujo andesítico.....</i>	44
Figura 3.28	<i>Flujo andesítico en forma de diaclasas formando pliegue en semicírculo.....</i>	45
Figura 3.29	<i>Flujo andesítico con estructura de bloques con presencia de fracturas escasas.....</i>	45
Figura 3.30	<i>Flujos andesíticos con múltiples plegamientos, flujos con estructura de diaclasas y en bloques.....</i>	45
Figura 3.31	<i>Flujo andesítico con presencia de fracturas rellenas de cenizas.....</i>	45
Figura 3.32	<i>Flujos andesíticos del Cerro el Barrigón.....</i>	46
Figura 3.33	<i>Flujos andesíticos presentes en escarpe.....</i>	46
Figura 3.34	<i>Brechas volcánicas que cubren parcialmente la cima del Cerro El Barrigón.....</i>	46
Figura 3.35	<i>Fractura por la cual emerge brecha volcánica sobre los flujos de andesita, la fractura presenta vestigios de hidrotermalismo.....</i>	46
Figura 3.36	<i>Afloramientos de flujos de dacíta.....</i>	47

Figura 3.37	<i>Dacita porfídica con gran presencia de cuarzo y plagioclasas....</i>	47
Figura 3.38	<i>Fracturas geológicas en cortes de roca, vestigios de antiguas minas de materiales pétreos.....</i>	48
Figura 3.39	<i>Fracturas evidentes al lado SW, contrario a la figura 3.38.....</i>	48
Figura 3.40	<i>Sistemas de fracturas en escarpes de derrames lávicos, hacia sus partes bajas generan deslizamientos de tierra.....</i>	48
Figura 3.41	<i>Fracturas que se muestra en la figura 3.40 sobre el flanco SW del escarpe.....</i>	48
Figura 3.42	<i>Fracturamiento en cortes geológicos de antiguas minas de materiales pétreos, generan inestabilidad en laderas.....</i>	48
Figura 3.43	<i>Cambio de dirección en el flujo de lava del flanco E de la estructura.....</i>	48
Figura 3.44	<i>Sistemas de fracturas dirección NE.....</i>	49
Figura 3.45	<i>Sistemas de fracturas dirección NE cortando a flujos de lava....</i>	49
Figura 3.46	<i>Brecha volcánica cortando por el medio flujo de estructura.....</i>	50
Figura 3.47	<i>Fracturas con buzamiento 90° con dirección NE-SW.....</i>	50
Figura 3.48	<i>Conjunto de fracturas en afloramiento de macizo rocoso.....</i>	51
Figura 3.49	<i>Brecha de falla justo al lado derecho de la figura 3.48.....</i>	51
Figura 3.50	<i>Corte geológico, muestra Brecha volcánica con bandeamientos.</i>	52
Figura 3.51	<i>Ampliación de clastos más pequeños de la brecha volcánica....</i>	52
Figura 3.52	<i>Corte estratigráfico de suelos, paleosuelos y derrames de andesita.....</i>	53
Figura 3.53	<i>Derrames de andesita con intercalaciones de brechas.....</i>	53
Figura 3.54	<i>Brechas volcánicas intercaladas con flujos piroclásticos con alto contenido de cenizas.....</i>	53
Figura 3.55	<i>Flujo piroclásticos con un promedio de 87% de ceniza volcánica en su contenido.....</i>	53
Figura 3.56	<i>Capas de derrame con fracturamiento vertical.....</i>	54
Figura 3.57	<i>Unidades de derrames de lava Dome.....</i>	54
Figura 3.58	<i>Unidades de brechas volcánicas, paleosuelos y suelos reciente..</i>	54

Figura 3.59	<i>Bandeamientos y pliegues de flujo en derrames lávicos.....</i>	56
Figura 3.60	<i>Muestra de andesita con manchones rosados posible presencia del proceso Mixing.....</i>	56
Figura 3.61	<i>Bandeamientos de flujo de lava.....</i>	56
Figura 3.62	<i>Brecha volcánica con clastos de domo volcánico destruido y que están soldados entre sí con lava.....</i>	56
Figura 3.63	<i>Falla con presencia de hidrotermalismo.....</i>	56
Figura 3.64	<i>Secuencias epiclásticas de origen aluvial y fluvial-lacustre.....</i>	56
Figura 3.65	<i>Depósitos de limonitas producto de intemperismo de andesitas...</i>	57
Figura 3.66	<i>Flujos piroclásticos con bloques de andesita, cubiertos de suelos.....</i>	57
Figura 3.67	<i>Flujos de brecha volcánica.....</i>	59
Figura 3.68	<i>Flujos de brecha volcánica con paleosuelos sobrepuestos.....</i>	59
Figura 3.69	<i>Depósitos piroclásticos.....</i>	59
Figura 3.70	<i>Bombas Volcánicas piroclásticos.....</i>	59
Figura 3.71	<i>Flujo andesítico n.1 con fracturamiento dirección SE-NW.....</i>	61
Figura 3.72	<i>Flujo andesítico n.2 con presencia a los lados de brecha volcánica.....</i>	61
Figura 3.73	<i>Arriba brecha volcánica, Abajo flujo andesítico n.2.....</i>	61
Figura 3.74	<i>Secuencia de estratos, Abajo flujo andesítico, al medio cenizas y arriba suelos.....</i>	61
Figura 3.75	<i>Bandeamientos de flujos.....</i>	61
Figura 3.76	<i>Estratos sobre puestas del Volcán El Perico.....</i>	62
Figura 3.77	<i>Conjunto de fracturas.....</i>	63
Figura 3.78	<i>Brecha volcánica presente en las partes altas del Volcán El Molcajete.....</i>	64
Figura 3.79	<i>Bandeamientos de materiales de flujo piroclástico, en las partes más bajas del volcán.....</i>	64
Figura 3.80	<i>Bandeamientos de materiales de flujo piroclástico, en las partes más bajas del volcán (Ampliación).....</i>	64

Figura 3.81	<i>Secuencia de unidades estratificadas cortadas por fractura.....</i>	67
Figura 3.82	<i>Unidades de depósitos lacustres.....</i>	67
Figura 3.83	<i>Depósitos fluviales provenientes de las unidades de Acahualco y San Lorenzo Cuauhtenco.....</i>	68
Figura 3.84	<i>Secuencia de unidades estratificadas.....</i>	68
Figura 3.85	<i>Secuencia de unidades estratificadas de oleadas piroclásticas y depósitos fluviales.....</i>	68
Figura 3.86	<i>Secuencia de oleadas piroclásticas en unidades estratificadas de espesores superiores a los 15 m desde la superficie hasta la base de los ríos cercanos.....</i>	68
Figura 3.87	<i>Secuencia de unidades estratificadas.....</i>	70
Figura 3.88	<i>Secuencia de unidades estratificadas sobre flujos volcánicos provenientes de la unidad el Tencho.....</i>	70
Figura 3.89	<i>Secuencia de unidades estratificadas.....</i>	70
Figura 3.90	<i>Mapa Geológico Estructural del área de estudio.....</i>	72
Figura 3.91	<i>Fotografía e esquema de representación de las Fallas La Mora (Av. Isidro Fabela dirección Torre Bicentenario).....</i>	74
Figura 3.92	<i>Fotografía e esquema de representación de Fallas Oxtotitlán (Av. Benito Juárez dirección delegación San Mateo Oxtotitlán).....</i>	75
Figura 3.93	<i>Fotografía e esquema de representación de la Falla Cerro del Calvario (dirección CU).....</i>	75
Figura 3.94	<i>Fotografía e esquema de representación de la Falla Coatepec (Av. Paseo Universidad dirección Av. Vicente Guerrero).....</i>	76
Figura 4.1	<i>Mapa hidrológico del área de estudio.....</i>	85
Figura 5.1	<i>Mapa de zona transicional.....</i>	96
Figura 5.2	<i>Mapa de peligros geológicos.....</i>	98
Figura 5.3	<i>Mapa de geológico (coincidencias de características geológicas).....</i>	102
Figura 5.4	<i>Mapa de pendientes.....</i>	103
Figura 5.5	<i>Mapa de climas.....</i>	104
Figura 5.6	<i>Mapa de uso de suelo.....</i>	105

Figura 5.7	<i>Mapa de presencia de agua.....</i>	106
Figura 5.8	<i>Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas para la obtención del mapa de susceptibilidad de deslizamientos.....</i>	107
Figura 5.9	<i>Mapa de susceptibilidad de deslizamientos.....</i>	110
Figura 5.10	<i>Mapa de velocidad de desplazamiento en el acuífero del Valle de Toluca.....</i>	111
Figura 5.11	<i>Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas para la obtención del mapa de subsidencia.....</i>	112
Figura 5.12	<i>Mapa de subsidencia.....</i>	114
Figura 5.13	<i>Mapa de peligros (Cartografía geológico-ambiental).....</i>	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	<i>Tipos comunes de deslizamientos de terreno y otros movimientos de ladera</i>	19
Tabla 2.2	<i>Tipos de subsidencia</i>	21
Tabla 3.1	<i>Columna estratigráfica</i>	35
Tabla 4.1	<i>Localización de multipiezómetros con registro de columnas estratigráficas</i>	91
Tabla 5.1	<i>Clasificación de rango de pendientes</i>	101
Tabla 5.2	<i>Valores asignados a características de mapas integrados en la metodología para la realización del mapa de susceptibilidad de deslizamientos</i>	108

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	<i>Mapa de cuerpos volcánicos</i>	127
Anexo 2	<i>Mapa de ubicación de registros recolectados en campo</i>	128
Anexo 3	<i>Tabla de registros recolectados en campo</i>	139
Anexo 4	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-137</i>	138
Anexo 5	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-158</i>	138
Anexo 6	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-162</i>	138
Anexo 7	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-163</i>	139
Anexo 8	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-367</i>	139
Anexo 9	<i>Columna estratigráfica, pozo PL-368</i>	139
Anexo 10	<i>Deslizamientos en los flancos SW del Cerro La Teresona</i>	140

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento y justificación del problema

En el centro de la ciudad de Toluca existen varias estructuras volcánicas que están ubicadas dentro de los municipios de Toluca, Zinacantepec y Almoloya de Juárez. Desde el punto de vista fisiográfico y topográfico estas estructuras reciben los nombres de Cerro de Coatepec, Cerro El Murciélago, Cerro La Teresona, Cerro Las Canoas, Cerro Tencho, Cerro El Aire, Cerro El Perico, Cerro Agua Bendita, Cerro El Calvario, Cerro El Conejo y Cerro Molcajete. De estas estructuras volcánicas se desconoce a escala de detalle su geología básica ya que existen mapas geológicos, pero son de escalas regionales como el mapa geológico estatal de IFOMEGEM (2009) y cartas del Servicio Geológico Mexicano (SGM). A esta escala regional no se pueden resolver problemas geológico-ambientales y de recursos hídricos que involucren a las estructuras volcánicas en relación con las zonas urbanas de Toluca en pleno desarrollo horizontal. Se han detectado la presencia de fallas y grietas activas en las laderas de algunas de estas estructuras volcánicas, como en el Cerro de la Teresona, Cerro El Perico y El Cerro Agua Bendita (Almazán-Vázquez, 2017).

La geología básica de las estructuras volcánicas permitirá elaborar un mapa con enfoque de geología ambiental lo que llevara como consecuencia a tener un conocimiento a detalle y amplio de posibles peligros geológicos ocasionados por la influencia de fracturas y grietas que se ubiquen en las estructuras volcánicas y zonas adyacentes a estas. Los peligros geológicos que se pueden desencadenar debido a laderas escarpadas en fallas geológicas pueden ser, por ejemplo, caídos de roca, deslizamientos y subsidencia por fallamiento y fracturamiento.

Un problema que se ha detectado en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) es la generación de grietas y fracturas que se han relacionado a la subsidencia por extracción de agua subterránea desde los años setentas (CNA, 2002; Hernández-Conde, 2014), sin embargo, estos trabajos de cartografía de grietas parece que se enfocaron al oriente del Valle de Toluca y son archivos de poca accesibilidad. Almazán-Vázquez (2017) y trabajos de protección civil de

Toluca muestra que existen grietas y fallas en el centro de Toluca. Almazán-Vázquez (2017) asocia la presencia de grietas a dos factores: fallas geológicas activas y extracción de agua subterránea. El mapa geológico ambiental de los pies de monte de las estructuras volcánicas permitirá tener un elemento geológico a considerar en posibles grietas que se generan en la interface roca y sedimentos aluviales y lacustres ya que se ha visto en la Ciudad de México como en Iztapalapa que las interfaces roca dura y lacustre es una zona de debilidad y pueden activarse grietas en estas zonas (Carreón-Freyre et al., 2017) por extracción de agua subterránea.

El conocimiento de una geología ambiental actualizada de las estructuras volcánicas y sus alrededores del centro de Toluca permitirá tener un mejor control para realizar trabajos a escalas más específicas y poder vislumbrar relaciones con las características hidrológicas del acuífero que cubre la zona, así como la relación que tiene el incremento poblacional y los peligros a los cuales se encuentra expuesta a consecuencia de actividades que alteran el medio en el que se desarrolla el ser humano.

Con este estudio se espera reconocer los peligros geológicos relacionados a fracturas y fallas geológicas en los volcanes del centro de Toluca y algunos controles estructurales en las características hidrológicas de la cuenca en donde se localizan los volcanes. El estudio permitirá a futuro reconocer con más facilidad peligros que puedan generarse por la extracción de agua subterránea como lo puede ser la subsidencia y cavidades subterráneas en las interfaces de roca sólida y sedimentos fluvio-lacustres en el pie de monte de los volcanes. El reconocimiento de tipos de roca y materiales geológicos en el pie de monte permite tener un mejor control a futuro de posibles riesgos por sismicidad

1.2 Objetivos

Objetivo General

Elaborar cartografía geológico-ambiental de los volcanes de la zona centro de Toluca mediante el uso de metodologías de geología de gabinete y campo para

reconocer posibles peligros geológicos relacionados a fallas geológicas y sus controles geológicos-estructurales en el acuífero de los alrededores.

Objetivos Específicos

- a) Elaboración de una cartografía geológico-ambiental de los volcanes del centro de Toluca comprendidos en los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez y Zinacantepec.
- b) Construcción de algunas secciones geológicas que muestran la relación entre las estructuras volcánicas, fallas y pozos de los acuíferos de los alrededores del área de estudio.
- c) Definición de peligros geológicos relacionados a fracturas y fallas geológicas de las estructuras volcánicas.

1.3 Metodología

Las metodologías y materiales que se emplearon como base de la investigación de tesis y para lograr los objetivos, se basaron principalmente en el método científico enfocado hacia las ramas de la geología ambiental, geología estructural e hidrogeología. Así también se tomó en cuenta los enfoques inductivo y deductivo que se realizaron en los diferentes pasos del trabajo (figura 1.1).

Para la realización del mapa geológico del área de estudio se realizó una fotointerpretación geológica de gabinete empleando imágenes de satélite de Google Earth y posteriormente verificación en campo de las relaciones geológicas interpretadas. Esta fotointerpretación geológica se reforzó con la cartografía del valle ya realizada por algunos trabajos regionales como los de IFOMEGEM (2009) y la carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM) del 2002. La fotointerpretación geológica comprendió en interpretar las diferentes tonalidades de colores en las imágenes posibles la diferenciación de características litológicas y

estructurales (fallas, fracturas y agrietamientos), y rasgos naturales de las formaciones volcánicas, útiles para la elaboración del mapa geológico-estructural.

En este trabajo la geología estructural como metodología se empleó para determinar y definir zonas de fracturamiento y presencia de fallas mediante la identificación de rasgos geológicos distintivos de fracturas y fallas en campo. El empleo de la Brújula Brunton, como un instrumento de trabajo geológico-estructural, sirvió para caracterizar la actitud estructural (rumbo, echado) de las fallas, fracturas y agrietamientos de las estructuras que se encuentran en los macizos rocosos. Las estructuras de deformación y datos geológicos se localizaron espacialmente con el uso del receptor GPS.

La cartografía geológico-ambiental implicó la integración de la cartografía geológica y cartografía geológico-estructural con datos interpretados en gabinete y de campo de índole ambiental. Los datos de índole ambiental y que se consideraron fueron peligros geológicos como, por ejemplo, escarpes de topografía abrupta, zonas de deslizamiento, zonas de inundación, fallas geológicas activas y grietas. Los datos cartográficos se digitalizaron empleando el software ArcGis. En la identificación de estos agentes perturbadores se emplearon métodos directos e indirectos partiendo a su vez de observaciones de campo. La cartografía geológica ambiental muestra los peligros geológicos posibles a los cuales se encuentra expuesta la población de los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez y Zinacantepec.

Durante la recolección de datos geológico-ambientales de campo se identificaron características de fracturamiento presentes en rocas o sedimentos, aportando información en relación a su comportamiento en interacción con el medio físico.

La cartografía topográfica de base para vaciar los datos geológicos y geológico-ambientales fueron la composición de las cartas topográficas de INEGI con los nombres Toluca (E-14-A-38) y San Miguel Zinacantepec (E-14-A-37) a escala 1:50,000. A su vez la topográfica sirvió para interpretar lineamientos estructurales y diferenciar estructuras volcánicas con base en su fisiografía y expresión topográfica.

A partir de los resultados geológico-ambientales y de geología estructural se realizó la integración de información de propiedades hidrológicas perteneciente a la misma zona de estudio. El mapa hidrogeológico implicó la interpretación de las unidades geológicas definidas previamente en función de su comportamiento como acuífero. A este mapa hidrológico se integró información como pozos de agua, cuerpos de agua y corrientes superficiales; adicionalmente se integraron los multipiezómetros publicados en la tesis enfocada a los recursos hídricos y de datos disponibles de la Comisión Nacional del Agua (Expósito, 2012 y CNA). Los pozos de monitoreo se analizaron en sus registros litológicos principalmente para analizar los espesores de las unidades líticas estableciendo relación entre unidades geológicas definidas en la cartografía geológico-ambiental. La relación entre pozos, multipiezómetros y unidades geológicas y geológico-ambientales se estableció con la elaboración de algunas secciones geológicas que permitieron también la determinación de algunos controles geológicos y estructurales en el agua subterránea.

Los multipiezómetros que se consideraron son los ubicados dentro del área de estudio y los más cercanos a las estructuras volcánicas. A las secciones geológicas se le integraron datos de pozos de monitoreo y datos geológicos-estructurales para al último interpretar las secciones geológicas desde el punto de vista hidrogeológico.

Mediante la revisión de gabinete se actualizaron mapas de segundo orden con el propósito de determinar los peligros de mayor probabilidad de ocurrencia, los cuales fueron:

- *Mapa de pendientes*: generado a partir del *shapefile* de curvas de nivel con separación de 10 metros entre curvas IFOMEGEM (2017).
- *Mapa de clima*: recuperado de los metadatos de la actualización del mapa geológico del Estado de México por el IFOMEGEM (2017).
- *Mapa de uso de suelo*: utilizando como base el *shapefile* de IFOMEGEM (2017) se digitalizó en el software ArcMap para actualizar el mapa y ser implementado en la realización de la cartografía geológico-ambiental.

- *Mapa hidrológico*: mediante la interpretación de datos de gabinete y de campo se implementó el mapa hidrológico y algunos otros rasgos que determinan un ambiente apto para la generación de peligros.
- *Mapa geológico estructural*: realizado con datos estructurales de IFOMEGEM (2017) y de la carta geológico-minera de la Ciudad de México (SGM, 2002), se hizo la homogenización de datos a los cuales se agregaron datos recolectados en campo de fallas, fracturas y agrietamientos.
- *Mapa de zona transicional*: se realizó tomando como base el mapa geológico y geológico estructural en donde se considera como la zona transicional aquella porción de mayor fracturamiento en los pies de monte de los volcanes.
- *Mapa de grado de coincidencias geológicas*: se tomó como referencia el mapa geológico y geológico estructural para hacer uno solo además de que se integraron rasgos particulares identificados en campo de propiedades estructurales particulares para las estructuras volcánicas.
- *Mapas de peligros geológicos*: recuperado de datos recolectados de gabinete el mapa de peligros se encuentra dentro del trabajo de Almazán-Vázquez (2017).

Posterior a ello se sometieron varios grupos de los mapas a una clasificación de valores dependiendo de sus particularidades con el propósito de realizar superposición de capas como se determina en el trabajo de García-Abad (2002), para la determinación de peligros los cuales conforman el mapa de Cartografía geológico-ambiental.

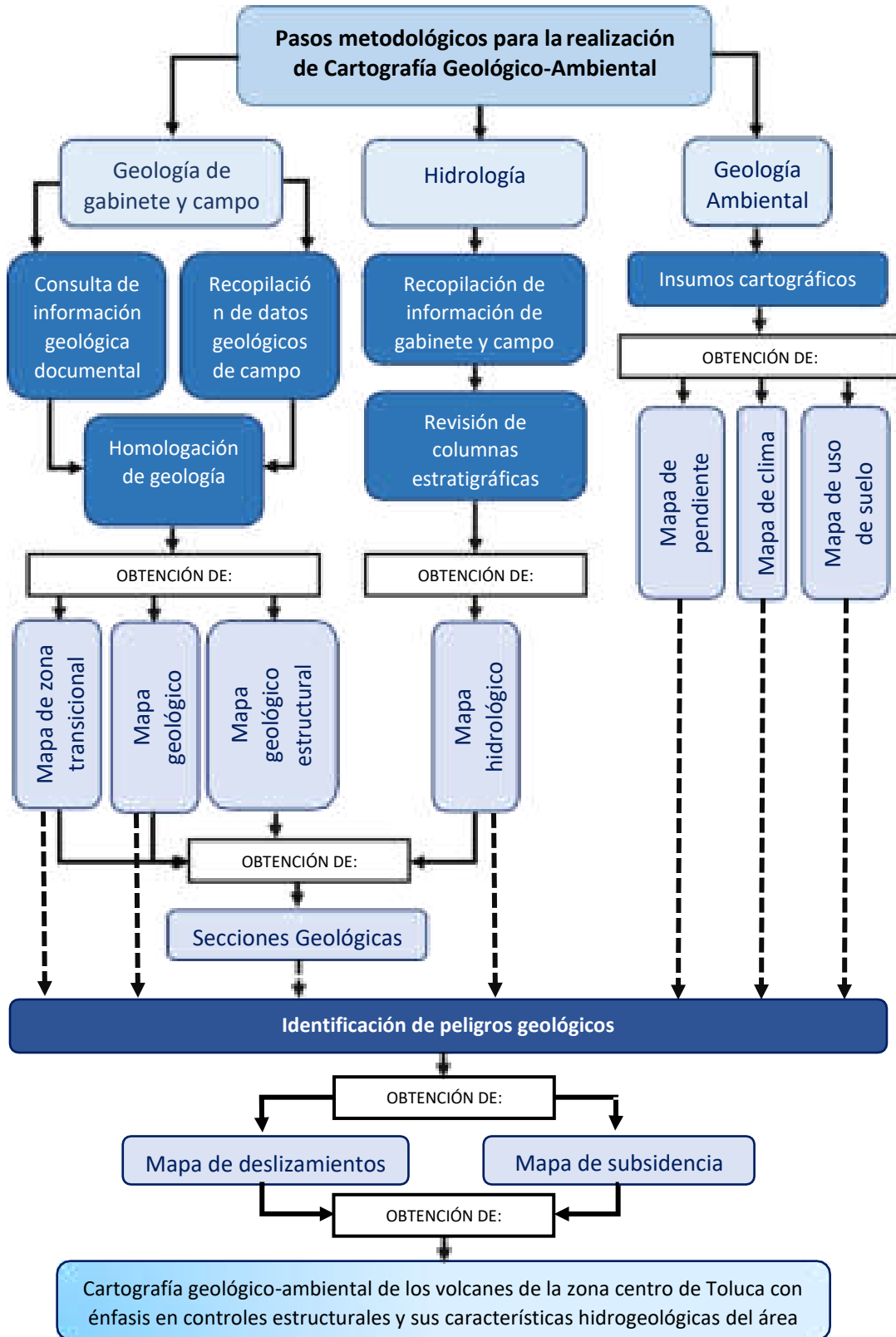


Figura 1.1 Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas en este trabajo y algunas actividades desarrolladas.

1.4 Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza dentro del Estado de México, y comprende las coordenadas extremas en el sistema UTM y datum WGS84 (figura 1.2) de 415000 m longitud oeste; 2144500 m latitud norte, y 434000 m longitud oeste; 2132000 m latitud norte. Esta área de estudio está comprendida dentro de los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez y Zinacantepec; colinda al norte con Temoaya, al suroeste con Texcaltitlán y Temascaltepec y al sureste con el municipio de Metepec como se muestra en la figura 1.2. El sitio de interés cubre un área aproximada de 251.4442 km², con altitud máxima topográfica aproximada de 3100 metros sobre el nivel medio del mar (msnm) que se localiza en la parte suroeste del área de estudio y que se debe a la cercanía con las faldas del Nevado de Toluca.

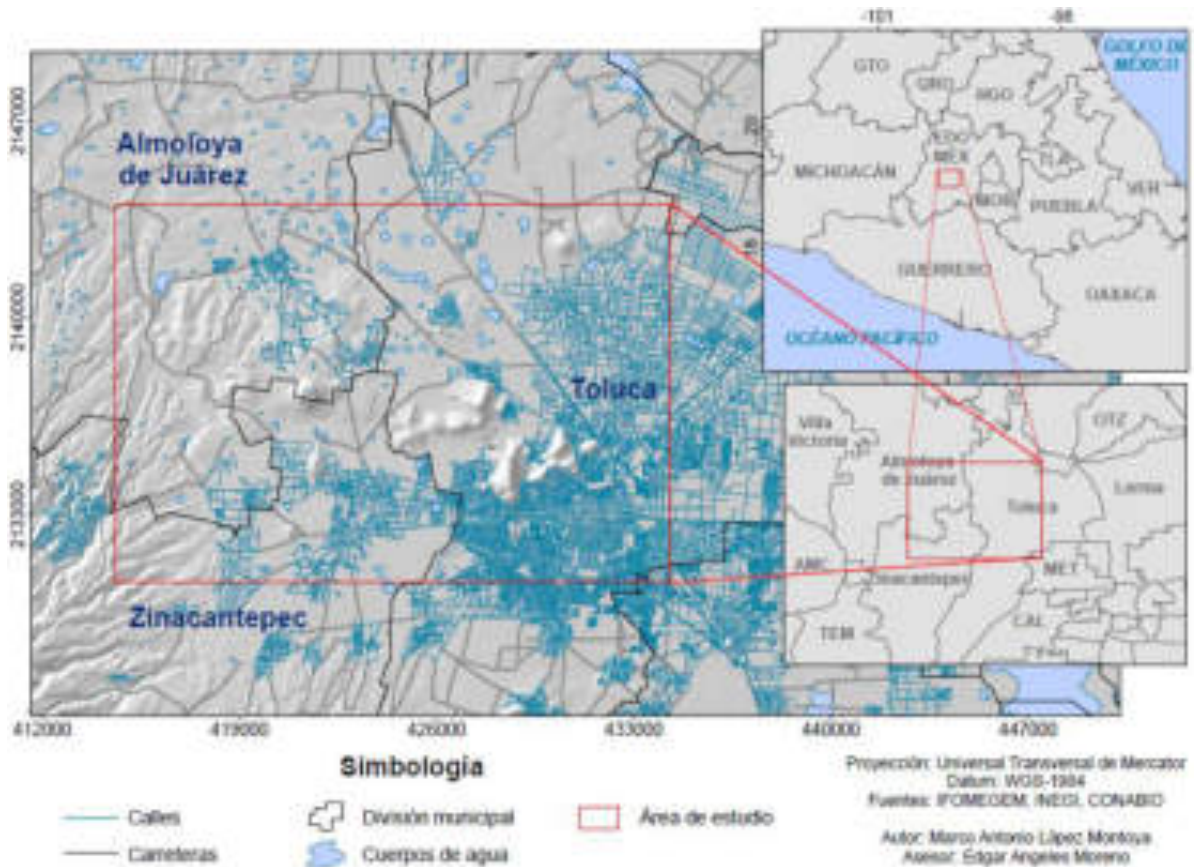


Figura 1.2 Mapa de localización del área de estudio.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)

El área de estudio está ubicada dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La FVTM es un arco volcánico continental activo desde el punto de vista geológico (Demant, 1978; Ferrari, 2000). La FVTM coincide en ser una región que concentra la mayor cantidad de población e infraestructura de México (Gómez-Tuena et al., 2005).

Demant (1978), define a la FVTM como un arco magmático continental, constituido de 8000 estructuras volcánicas y otros cuerpos intrusivos. De acuerdo a Pasquaré et al. (1988) la FVTM se divide en tres sectores de según su geología y tectónica que son el occidental, el central y el oriental (figura 2.1). En la posición central se encuentra el área de estudio de este trabajo de tesis. La parte central es limitada en el oriente por el sistema de fallas Taxco- San Miguel de Allende (Alanís-Álvarez et al., 2002a).

La actividad volcánica de la FVTM data desde el Mioceno que está registrada en los complejos volcánicos de la sierra de Mil Cumbres y la sierra Angangeo, en el Estado de Michoacán (Capra et al., 1997), y algunas áreas de Tenancingo y Malinalco, Estado de México (García-Palomo et al., 2000).

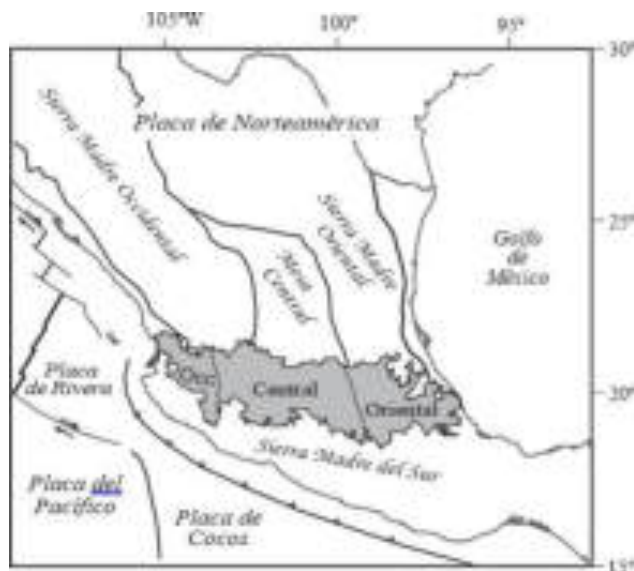


Figura 2.1 Mapa de ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (Fuente: Pasquaré et al., 1988).

En el sector central de la FVTM y en cercanía con el área de estudio se ha documentado actividad volcánica desde el Plioceno al Holoceno; por ejemplo, la Sierra de las Cruces tiene edades de ca. ~3.7 Ma (Osete *et al.*, 2000) y también edades del Plioceno se han documentado en el campo volcánico de Apan, en el norte de la cuenca de la Ciudad de México (Gómez-Tuena, *et al.*, 2005; García-Palomo *et al.*, 2002). Una parte del sector central de la FVTM corresponde con conos monogenéticos del Cuaternario que forman la Sierra Chichinautzin (Martín-Del Pozzo, 1982) y que se encuentran hacia el oriente y sureste de la zona de estudio.

- El Estado de México en el contexto de la FVTM

El área de estudio de los volcanes de Toluca se encuentra dentro de la cuenca del Valle de Toluca y a su vez dentro del Estado de México. El Estado de México está en la porción central de la FVTM y la manifestación volcánica de esta abarca por completo al Estado de México de acuerdo a la cartografía geológica compilada por INFOMEGEN (2009). Estructuras volcánicas que limitan a la cuenca del valle de Toluca y que pertenecen al sector central de la FVTM son la Sierra de Las Cruces, Nevado de Toluca, Sierra de Chichinautzin, volcanes del norte del estado y rocas volcánicas del sur del estado. La Sierra de Las Cruces es un complejo de estratovolcanes y domos volcánicos del Mioceno y Cuaternario (García-Palomo *et al.*, 2008; Osete *et al.*, 2000) que limita a la Cuenca de la Ciudad de México y la cuenca del Valle de Toluca. El Nevado de Toluca se ubica al suroeste del área de estudio y es un estratovolcán que ha tenido actividad volcánica desde el Mioceno con sus mayores actividades volcánicas durante el Cuaternario (García-Palomo *et al.*, 2002). Volcanes de la Sierra de Chichinautzin de edad del Cuaternario se han documentado en la parte sur de la Sierra de Las Cruces y entre las poblaciones de Xalatlaco y Tenango (García-Palomo *et al.*, 2002). En la parte norte de la cuenca del Valle de Toluca existen volcanes del tipo calderas, estratovolcanes, conos cineríticos y domos que abarcan edades desde el Mioceno al Cuaternario. Por ejemplo, está el estratovolcán Jocotitlán que ha tenido actividad volcánica durante el Pleistoceno (Macías *et al.*, 1997) y el estratovolcán Temascalcingo (Roldán-

Quintana et al., 2001) así también está la caldera de Amealco cuyas rocas abarcan hasta Acambay y que es parte de varias calderas de la parte central de la FVTM y que produjeron tobas pumicíticas e ignimbritas que se distribuyeron por miles de kilómetros cuadrados (Gómez-Tuena et al., 2005).

En la parte sur del estado, como en parte se ha mencionado, contiene rocas volcánicas del Mioceno y en específico en el área de Malinalco-Tenancingo (García-Palomo et al., 2000). Otras edades de Ar-Ar en un rango de 19.5 y 16 Ma en secuencias lávicas basales de Malinalco y Tenancingo han sido obtenidas por Ferrari (2000).

En el poniente del estado que corresponde con la región de Maravatio-Zitacuaro-Valle de Bravo se han documentado conos monogenéticos del Pleistoceno medio al Holoceno y algunos conjuntos de domos dacíticos de edad cuaternaria (Capra *et al.*, 1997; Blatter *et al.*, 2001).

2.2 Geología y geología ambiental

2.2.1 Antecedentes geológicos

2.2.1.1 Estratigrafía de la cuenca del Valle de Toluca

La estratigrafía del Valle de Toluca de acuerdo a el mapa de IFOMEGEN (2009) y trabajos antecedentes (Bloomfield y Valastro, 1974; Osete et al., 2000; Arce et al., 2005; García-Palomo et al., 2000, 2002, 2008) desde las rocas más antiguas a las más jóvenes se encuentra constituida de rocas volcánicas andesíticas y basálticas del Mioceno que se ubican en el Nevado de Toluca, en Tenango-Malinalco y partes basales de la Sierra de Las Cruces; estas rocas son seguidas estratigráficamente en posición por rocas volcánicas andesítico-basálticas, piroclásticas y epiclásticas del Plioceno que se ubican en el Nevado de Toluca-Volcán San Antonio, en la Sierra de Las Cruces, en Tenango, en Jiquipilco y en la zona de San Felipe del Progreso. Las rocas del Cuaternario comprenden a rocas volcánicas basálticas de conos piroclásticos y de escoria que se ubican en el oriente de la cuenca (Bloomfield, 1974); comprende también a rocas epiclásticas, fluvio-lacustres (Almazán-Vázquez,

2017) y a rocas piroclásticas del centro del Valle de Toluca como la pómez Toluca (Arce et al., 2015).

2.2.1.2 Geología estructural de la cuenca del Valle de Toluca

El valle de Toluca está localizado entre varios sistemas de fallas, las fallas de la Sierra de Las Cruces en la parte oriente, la falla Ixtlahuaca al norte, la falla Tenango al sur y fallas en el Nevado de Toluca al poniente.

Las fallas en la Sierra de Las Cruces presentan tres direcciones que son N-S, E-W y NE-SW (García-Palomo et al., 2008). Estas fallas cortan a las rocas volcánicas andesíticas y dacíticas que conforman a la sierra; estas rocas se han fechado en edades del Mioceno y Cuaternario (Osete et al., 2000; García-Palomo et al., 2008).

La falla Ixtlahuaca limita al Valle de Toluca del valle de Ixtlahuaca en su parte norte, esta falla tiene una dirección E-W y desplaza rocas volcánicas del Plioceno en la Sierra de Las Cruces (García-Palomo et al., 2008).

En la parte sur del valle de Toluca se localiza la falla Tenango que presenta un rumbo E-W y echado hacia el norte (Figura 2.2). Esta falla es incluida en un sistema de fallas denominado Tenango por García-Palomo et al. (2000). La edad de la actividad de este sistema de fallas fue considerada del Pleistoceno temprano por Bloomfield (1974) y Norini et al. (2006) considera a la falla Tenango como una falla activa y con actividad sísmica.

En el poniente del Valle de Toluca se localizan dos estratovolcanes como son el volcán San Antonio y el Nevado de Toluca que están afectados por fallas con direcciones NE-SW y NW-SE (García-Palomo et al., 2000). Las fallas cortan a rocas volcánicas andesíticas y dacíticas de ambos estratovolcanes de edad del Plioceno-Pleistoceno (García-Palomo et al., 2000).

En la parte central de Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y que en parte abarca parte del área de estudio de esta tesis, se han descrito por Almazán-Vázquez (2017) la presencia de fracturas y fallas que cortan a domos volcánicos

andesíticos-dacíticos, a rocas piroclásticas y fluvio-lacustres en la ciudad de Toluca que son de edad del Cuaternario (Figura 2.2).

Se localiza dentro de una zona tectónica que tuvo su origen durante el Terciario Medio-Superior, tanto este valle como el de Ixtlahuaca forman parte de la cuenca del Alto Lerma.

Se infiere que ambos valles fueron subcuencas endorreicas, con un drenaje radial y convergente hacia el centro de las mismas, actualmente están divididos topográficamente por una serranía que en el llamado Estrechamiento de Perales forma una garganta que las comunica y por donde pasa el río Lerma, que drena con rumbo NW hacia Atlacomulco, formándose de hecho una cuenca exorreica.

En general la cuenca del Alto Lerma está conformada estructuralmente como una serie de escalonamientos en forma de fosas, limitada por pilares que forman las serranías.

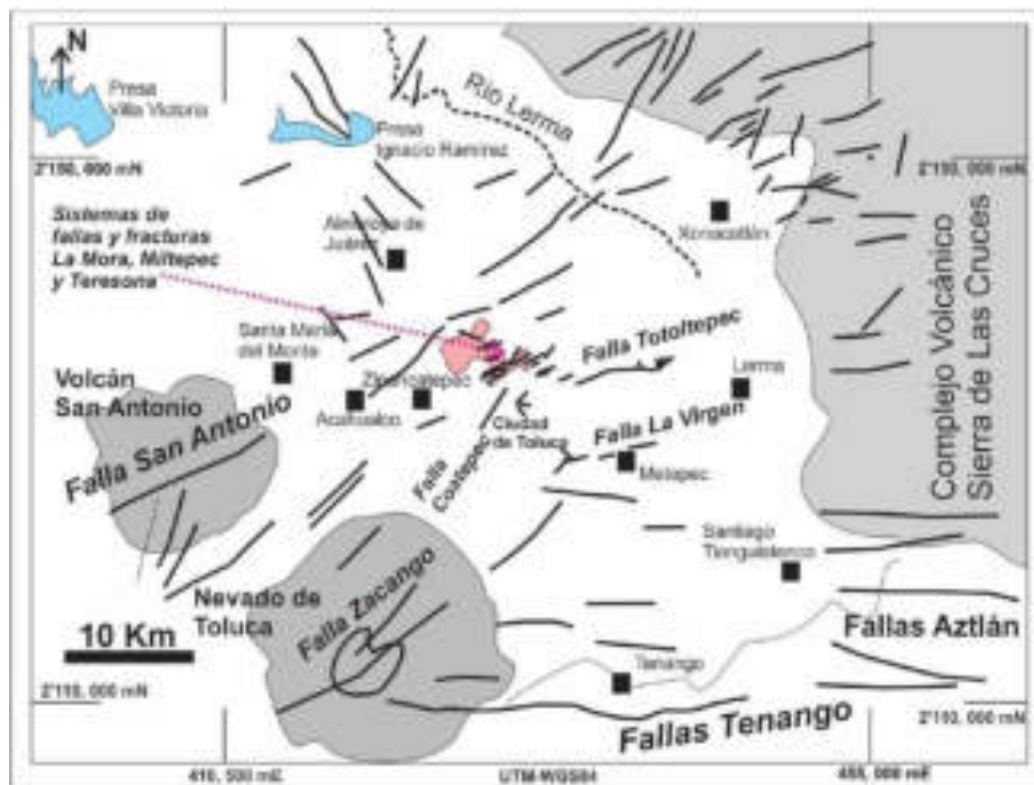


Figura 2.2 Mapa de fallas y fracturas en el Valle de Toluca (Fuente: Almazán-Vázquez, 2017).

Las fallas más importantes que lo cruzan son la falla normal Tenango de Arista, con rumbo E-W y echado hacia el norte; la del Estrechamiento de Perales, también del tipo normal, con el mismo rumbo y echado que la anterior, y las de Boxipe, normales, con rumbo NW-SE y echado EN. Estos sistemas estructurales forman los citados escalonamientos, que descienden hacia el norte y noroeste, estando el primero de estos escalonamientos ocupado por el valle de Toluca.

2.2.1.3 Geología del área de estudio

La geología del área de estudio no existe a escala 1: 20 000 que es la escala del presente trabajo. La geología que se considera en esta sección es de acuerdo a la cartografía regional del mapa IFOMEGEM (2009) y de la cartografía geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano carta E14-2 Ciudad de México. En el área de estudio afloran andesitas y dacitas que constituyen los cerros de la Teresona-Agua Bendita (SGM, carta E14-2, 1997; IFOMEGEM, 2009), los cerros del Molcajete, El Aire y otros de Almoloya de Juárez son cartografiados como andesitas y basaltos por el SGM (1997) y como derrames de lava andesítico-basáltico en conos cineríticos en el mapa IFOMEGEM (2009). Las partes bajas en el área que rodea a los volcanes de Toluca es cartografiada como interestratificación de depósitos aluviales, depósitos lacustres y tobas (SGM, 1997; IFOMEGEM, 2009).

En el trabajo de Expósito (2012) se describe en el área constituida por afloramientos rocosos con edades del Terciario Medio (26 millones de años) constituido por complejos volcánicos en las partes altas, con composiciones de basaltos, andesitas y materiales piroclásticos, los cuales incluyen en su composición tobas, aglomerados, cenizas volcánicas, conos cineríticos, derrames lávicos, lahares y materiales de desintegración (arenas, gravas, arcillas limosas y depósitos lacustres); los depósitos lacustres se localizan en sitios donde existieron lagunas, como de Almoloya de Juárez compuestas de sedimentos arcillosos y limosos como capas delgadas.

De acuerdo a la cartografía geológica compilada por el Instituto de Geología de la UNAM (1994) y citada en el trabajo de Expósito (2012), en el área de estudio se tienen las siguientes litologías:

- *Sedimentos lacustres*: los cuales se componen de conglomerados, arenisca y limolita semiconsolidadas, interestratificadas con capas de toba, pómez y diatomita.
- *Aluvión*: composición de gravas, arenas y limos con interestratificación de ceniza volcánica en el Valle, resultado de la actividad volcánica, ríos y arroyos.
- *Derrames de lava*: característicos por tener composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas asociadas.
- *Derrames de lava de composición basáltica y andesítica*: con depósitos cineríticos, aglomerado y brecha de derrames asociados. En el volcán Nevado de Toluca, predominan rocas del tipo andesítico y dacítico.
- *Lahar y depósitos volcanoclasticos*: con menores cantidades de depósitos fluviales interestratificados, además de formaciones que consisten esencialmente de lahares, pómez y depósitos piroclásticos.
- *Lavas basálticas y andesíticas*: indiferenciadas (andesita del área de Toluca).

2.2.2 Antecedentes geológico-ambientales

2.2.2.1 Conceptualización general de geología ambiental

El medio ambiente es la suma de todas las características y condiciones que rodean a un organismo vivo y que pueden influenciar a este. Estas características se pueden dividir en un ambiente natural y el ambiente social, y estos dos ambientes influyen en la vida de los seres humanos. Debido a que la Tierra sólida y del medio físico nos da el ambiente básico para poder vivir, entonces toda la geología que nos rodea se podría decir que es geología ambiental sin embargo se considera a la geología ambiental como a aquella geología que se relaciona directamente a las actividades humanas (Montgomery, 2008).

En la geología ambiental existen procesos geológicos que pueden afectar a las actividades humanas y por ello debe manejarse los conceptos de riesgo, exposición, vulnerabilidad y peligro.

- **Riesgo**

El riesgo de acuerdo con CENAPRED (2006) se debe entender como la probabilidad de ocurrencia de daños, ocasionados por fenómenos naturales o antrópicos, generando efectos indeseables sobre determinados sistemas como bienes, infraestructura, asentamientos humanos o campos de producción de alimentos, a consecuencia de eventos perturbadores.

SINADESI (2010), en UNESCO 2011 especifica al riesgo como la suma de posibles pérdidas a causa de un desastre o evento adverso, ya sean vidas humanas, condiciones de salud, infraestructura, medios de sustento o bien pérdida de hábitats naturales, durante un tiempo y espacio específicos.

Al hablar de un riesgo natural se toma en consideración que este puede ser del tipo geológico, hidrológico o atmosférico (Cardona, 1993).

Con el objetivo de cuantificar el riesgo, CENAPRED (2006) ha usado la siguiente ecuación a partir de tres variables: peligro, vulnerabilidad y exposición.

$$\text{Riesgo} = [(\text{Peligro}) (\text{Vulnerabilidad}) (\text{exposición})]$$

$$R = [(P) (V) (E)]$$

Dentro de la ecuación se expresa al riesgo en términos monetarios, mientras que el peligro y la vulnerabilidad se muestran como posibilidades, y en cuanto a la exposición es la estimación en términos monetarios, lo cual permitiría que el riesgo fuese la fracción del costo de los sistemas expuestos o afectados por un evento catastrófico.

En el caso de un riesgo geológico, este riesgo es perteneciente a los riesgos naturales físicos, El estudio de los riesgos geológicos tiene el objetivo de elaborar medidas destinadas a la prevención o corrección empleando conocimientos geológicos (Asencio, 2008).

- **Peligro**

El Peligro es la primera variable del riesgo y se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o antrópico, con el potencial para generar daño en un determinado tiempo específico y lugar conocido (CENAPRED, 2006). Para identificar un peligro es importante definir los fenómenos perturbadores volviéndolos parámetros cuantificables por medio y con apoyo de la ciencia y tecnología. De acuerdo a CENAPRED (2006) los fenómenos generadores de peligro pueden cuantificarse por dos medidas, la magnitud e intensidad.

- **Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad, de acuerdo con el documento de UNESCO (2011), queda definida como susceptibilidad de un sistema a ser afectado por algún fenómeno que lo perjudique, dicha vulnerabilidad puede ser del tipo físico, social, económica, cultural, institucional, entre otros. Cabe destacar que la vulnerabilidad disminuirá si el sistema aumenta sus capacidades en combinación de fortalezas, atributos y conocimientos (UNESCO, 2011).

- **Exposición**

La exposición se refiere a la cantidad de humanos, bienes y sistemas que se ubican en un lugar conocido y que es factible que sea dañado por algún fenómeno (CENAPRED, 2006). De acuerdo con Almazán-Vázquez (2017) a esta variable se le asignan valores monetarios, ya que así es una manera de cuantificar los daños aunque no en todas las ocasiones se traduce a dinero.

2.2.2.2 Antecedentes geológico-ambientales

- **Peligros por fracturamiento**

En el área de estudio, volcanes del centro de Toluca, se han documentado peligros y riesgos por formación de grietas por subsidencia hídrica y fracturas y fallas geológicas (Almazán-Vázquez, 2017). Los peligros por fracturamiento también se han reportado en algunas ciudades económicamente importantes del centro de México, por ejemplo, Querétaro (Aguirre-Díaz et al., 2000), Morelia (Garduño-

Monroy et al., 2001), Cd. De México, Puebla y que adicionalmente se encuentran a lo largo de la FVTM (Almazán-Vázquez, 2017). Estas ciudades comparten en común problemas geológicos relacionados con la formación de fallas activas, pero también problemas con formación de fracturas y grietas relacionadas a la sobreexplotación de sus acuíferos de agua potable.

- **Deslizamientos de Tierra**

Los deslizamientos de tierra se definen como cualquier tipo de movimiento en masa con un movimiento rápido a lo largo de una ladera (Protección civil, 2016), el material puede ser rocas o suelo, en donde pueden identificarse en la tabla 2.1.

La estabilidad de una ladera está determinada por ciertas variables como litología, estructuras, pendiente, clima, uso de suelo y agua superficial y subterránea. Estas variables o factores interactúan y bajo determinadas condiciones pueden generar los deslizamientos. Siguiendo con la metodología de integración de mapas temáticos (integración SIG) y que tratan de los factores que influyen en los deslizamientos se obtiene un producto final de análisis que es un mapa de deslizamientos.

Los factores en forma de mapas temáticos que pueden estar involucrados en el proceso de superposición de mapas para la determinación del mapa de deslizamiento de acuerdo a la cartografía temática del medio físico (García-Abad, 2002) son:

- Mapas Meteorológicos: Mapas sinópticos y mapas de meteoros.
- Mapas Climáticos: Mapas de Exposición/orientación, mapa de diferentes elementos climáticos y mapas de tipos de climas.
- Mapas Geológicos: Elementos tectónicos y geoestructurales, elementos litológicos, geología histórica y estratigrafía, y sismología.
- Mapas Geomorfológicos: Altitud o mapas topográficos, pendientes, formas del relieve, elementos morfoestructurales, elementos morfodinámicos y elementos morfocronológicos.

- Mapas Hidrológicos: Mapas hidrográficos, mapas hidrogeológicos y datos de propiedades del agua.
- Mapas Edafológicos: Mapas de tipo de suelo y mapas que representan propiedades del suelo.
- Mapas Biogeográficos: Mapas corológicos, mapas de vegetación actual o uso de suelo, mapas de vegetación potencial y mapas de territorios biogeográficos.
- Mapas Oceanográficos: involucran características de los mapas anteriormente mencionados.

Tabla 2.1 Tipos comunes de deslizamientos de terreno y otros movimientos de ladera (Keller et al., 2007).

Mecanismo	Tipos de movimiento	Características
Caída	Caída de roca	Caen rocas individuales por el aire y pueden acumularse como talud
Deslizamiento	Deslizamiento de suelo	Suelo y otros materiales de la tierra erosionados se desprenden en una superficie inclinada curva: de lecho de roca o sedimento cohesivo; también denominado desprendimiento de detritos de tierra
	Desprendimiento de rocas	Grandes bloques de lecho de roca se desprenden en una superficie plana, con planos de estratificación o foliación (metamórfica)
Flujo	Avalancha	Flujo granular de diferentes combinaciones de nieve, hielo, detritos orgánicos, rocas sueltas o suelo que se mueve con mucha rapidez pendiente abajo
	Arrastre	Movimiento muy lento ladera debajo de rocas o suelo
	Flujo de tierra	Masa de suelo y roca erosionada húmeda, prácticamente cohesiva internamente deformada

- **Tipos de subsidencia**

Corapcioglu (1984), indica que la subsidencia es un proceso de hundimiento paulatino ya sea de la corteza terrestre, continental o submarina. En lo que corresponde a la subsidencia terrestre, se diferencia como un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie en un área ocasionada por diversos factores, ya sean naturales o causados por actividades antropogénicas (Corapcioglu, 1984).

Es por ello al ser un proceso de deformación en donde se define desde el punto de vista genético dos tipos de subsidencia: endógena que hace referencia a los movimientos producidos en la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc., y exógena la cual se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos (Prokopovick, 1979; Tomás et al., 2009).

En general existen varios tipos de subsidencia de terreno, y de acuerdo a Scott (1979) se han clasificado de acuerdo al elemento o mecanismo que las desencadena, como se muestra en la tabla 2.2.

La subsidencia por disolución subterránea se da en ambientes kársticos en donde se forman cavernas y otras formas naturales de cristalización. La Subsidencia por construcción de obras subterráneas o minería generarse a partir de obras subterráneas para extraer minerales y que pueden ocasionar deformaciones y la generación de fracturas y fallas que pueden incidir en el terreno superficial acomodándolo (Keller et al., 2004).

Tabla 2.2 Tipos de subsidencia (Fuente: Scott, 1979).

Subsidencia por disolución subterránea	En Sal
	En yeso
	En rocas carbonatadas
Subsidencia por construcción de obras subterráneas o minería subterránea	
Subsidencia por erosión subterránea	
Subsidencia por flujo lateral	En rocas salinas
	En arcillas
Subsidencia por compactación	Por recarga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
Subsidencia por tectónica	

La subsidencia por erosión subterránea puede ser originada por el arrastre de partículas del suelo ocasionado por el flujo de agua subterránea, al movilizar partículas y generando canales que pueden desencadenar colapsos en el terreno superficial. La subsidencia por compactación por vibración se origina al haber movimientos vibratorios ocasionados por terremotos, explosiones u otras causas de carácter antrópico que permiten el reacomodo de suelos granulares, provocando la compactación de estos. La subsidencia por extracción de fluidos se da cuando se extraen fluidos como lo es el agua o petróleo con gas, es uno de los factores desencadenantes más comunes, ya que una vez que los poros subterráneos son vaciados, generan en conjunto huecos susceptibles a reacomodo de los sedimentos que soportaban la superficie del terreno (Keller et al., 2004); en el caso particular de la extracción de agua subterránea se provoca una subsidencia del terreno que se denomina en ocasiones subsidencia hídrica. La subsidencia por hidrocompactación es determinada de acuerdo al tipo de suelo y el grado de humedad que este posee

sobre el nivel freático. La presencia de humedad o bien agua puede ocasionar dos efectos: la disolución de enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares que establecen la estructura subterránea. Y la subsidencia por tectónica se produce debido a fallas, aunque este proceso es muy lento y de baja magnitud, avanzando un rango de milímetros hasta unos cuantos centímetros por año.

La subsidencia es un fenómeno de carácter geológico que ocasiona afectaciones en donde se presenta, al punto de representarse en forma de afectaciones a la infraestructura y poniendo en riesgo vidas humanas. Las urbes son las más expuestas a este tipo de fenómenos, ya que en ellas suele presentarse con mayor frecuencia cualquiera de los diferentes tipos de subsidencia presentados, a causa del crecimiento poblacional se supone un riesgo importante para cualquier tipo de obra que se ubica sobre un terreno que se deforme.

- **Peligros por subsidencia hídrica (Extracción de Fluidos)**

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se han localizado grietas que dañan a la infraestructura urbana como calles, banquetas y bardas (Almazán-Vázquez, 2017). Estas grietas se han relacionado en parte con la extracción de agua subterránea para algunas partes del valle de Toluca (diversos trabajos técnicos no publicados y que aparecen en el documento de la CNA, 2002; Expósito, 2012; Hernández-Conde, 2014). En el área de estudio y en la periferia de algunos cerros como La Teresona, El Obispo, Agua Bendita se cartografiaron grietas que podrían tener relación con subsidencia hídrica y con fallas geológicas a profundidad (Almazán-Vázquez, 2017).

De acuerdo a Almazán-Vázquez (2017) algunas de las afectaciones a causa del fenómeno de subsidencia se relacionan directamente con la extracción de agua provocando daños materiales, afectaciones al medio físico natural y la pérdida de vidas humanas.

- **Peligros por subsidencia a causa de fallas**

Las fallas son un tipo de fractura en las cuales las rocas en las que se presentan muestran un desplazamiento, el cual se da cuando una cara de la roca se mueve

en relación a la otra. El desplazamiento está determinado por el movimiento de un marcador geológico que pueden ser los estratos de roca u otro cuerpo tabular previo a la falla que sean afectados por la falla. Cuando ocurre el desplazamiento en una falla, este va acompañado de un deslizamiento en el espejo de falla y este deslizamiento se puede cuantificar como una velocidad de deslizamiento y se registra en milímetros por año. La fallas representan un riesgo importante ya que al ocurrir una ruptura esta libera energía suficiente en ocasiones para generar ondas sísmicas (Keller et al., 2004).

La subsidencia de un terreno superficial relacionada con el desplazamiento de una falla no es fácil de caracterizar, pero se ha documentado que ocurre en las ciudades de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001), Querétaro (Aguirre-Díaz et al., 2000) y Toluca (Almazán-Vázquez, 2017).

En la ZMVT Almazán-Vázquez (2017) argumenta que las fallas geológicas juegan un papel importante en la reactivación y generación de grietas y fallas por subsidencia. En el trabajo de Almazán-Vázquez (2017) define varios sistemas de fallas y fracturas que se localizan en la ciudad de Toluca, como son fallas La Teresona, Miltepec, La Mora, Oxtotitlán, Lerdo y Totoltepec.

En la actualidad las ciudades son las más afectadas por la subsidencia debido al crecimiento poblacional que aumenta la carga de peso sobre los acuíferos en donde se desarrollan, comprendiendo también a más factores como desencadenantes del proceso de subsidencia. Algunas de las ciudades que se ven más afectadas son el ejemplo de la Ciudad de México y Querétaro, los cuales se describirán brevemente.

- **Implicaciones de riesgo sísmico**

En el área de estudio los estudios por sismicidad no han sido considerados actualmente como un tema fuerte de investigación, ya que los acontecimientos sucedidos a lo largo de la historia de sismicidad en el centro de México han tenido mayor relevancia para el Valle de México. De entre los sucesos más representativos el más reciente es el del 17 de septiembre de 2017 el cual se originó en la placa oceánica de Cocos generando un sismo intraplaca, a una profundidad de 57 km en

las costas del Estado de Guerrero a unos 120 km de la Ciudad de México (UNAM, 2019). Este sismo en la Ciudad de México afectó a las zonas transicionales de la parte poniente, que es una zona transicional entre Las Lomas y las zonas lacustres del Lago de Texcoco de acuerdo al zoneamiento geotécnico del Valle de México.

Las fallas geológicas asociadas al sismo de septiembre de 2017 fueron consideradas normales y afectaron directamente a las edificaciones civiles principalmente. La Ciudad de México y la Ciudad de Toluca esta situadas sobre sedimentos blandos que facilitan la dispersión de ondas (UNAM, 2019), a estas características se asocian las propiedades de fallamiento y fracturamiento en la parte central del área de estudio. La presencia de la zona transicional definida en este trabajo es un primer acercamiento a establecer esta zona como una zona de riesgo sísmico ya que se encuentra poblada y la ciudad de Toluca sigue creciendo así como la naturaleza transicional de sedimentos compactables a rocas no compactables y duras como andesitas, dacitas y basaltos.

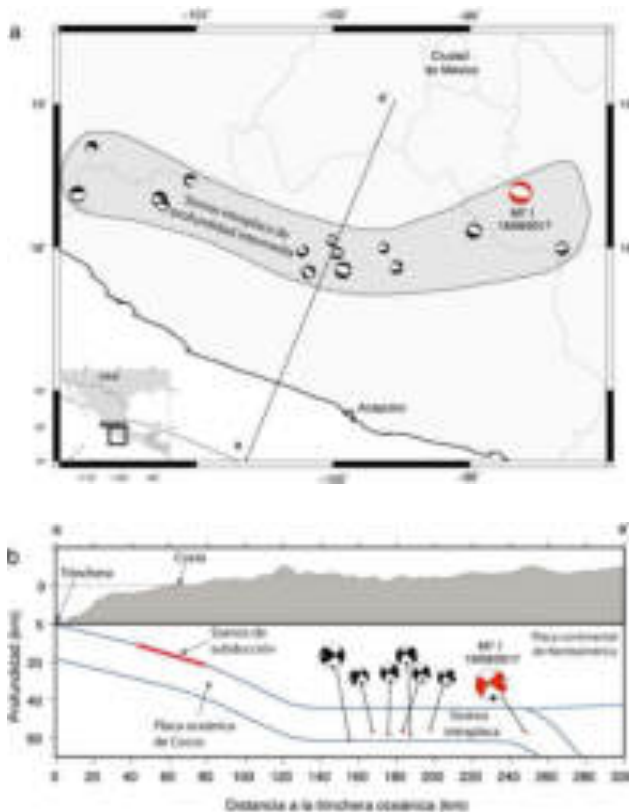


Figura 2.3 Localización del sismo de magnitud 7.1 del 19 de septiembre de 2017 (color rojo) y algunos otros del mismo tipo en la región (fuente: UNAM, 2019).

Las características de las obras civiles de la Ciudad de Toluca no se encuentran expuestas en un mismo porcentaje a las de la Ciudad de México, la presencia de construcciones relativamente bajas no representa riesgo más que en los edificios altos como es el caso del Edificio de Rectoría de la Universidad Autónoma del Estado de México, los edificios corporativos de Telmex e Imbursa. A futuro se prevé que de acuerdo al crecimiento poblacional las edificaciones se modifiquen para sustentar necesidades, aumentando el riesgo por actividad sísmica.

2.2.3 Antecedentes Hidrológicos

2.2.3.1 Hidrogeología general

Padilla (2012), en su primer curso de geología aplicada, conceptualiza a la hidrogeología como una faceta de la hidrología que estudia las aguas almacenadas de forma subterránea. Con anterioridad se contemplaba a la hidrogeología como el pilar de la búsqueda y explotación de aguas subterráneas. Actualmente la pérdida de calidad del agua se considera un problema socio-económico de carácter fuerte, a partir del cual se han modificado técnicas, como su transporte, transformación de contaminantes y restauración de sitios en donde el agua es afectada.

En la actualidad el agua es el recurso número uno en demanda a nivel mundial, debido al alto consumo diario ya sea para consumo o producción de alimentos y/o productos. Debido a ello el agua es vulnerable a distintos procesos que modifican su calidad, por ellos la hidrogeología hace indispensable el estudio de su comportamiento en estado natural, así como procesos que mejoren el estado del agua (SGM, 2016). El SGM (2016), especifica que todos los recursos deben de estimarse a corto, mediano y largo plazo con el fin administrar el recurso hídrico, salvaguardando la calidad y cantidad apropiada en las diferentes regiones para no comprometer los sistemas funcionales a partir del agua.

- Acuífero

Un acuífero se refiere a formaciones geológicas las cuáles almacenan y permiten la fácil circulación del agua subterránea, a lo que atiende como formación geológica a un cuerpo rocosa de dimensiones apreciables como producto de la dinámica

terrestre; teniendo como ejemplo un depósito de duna, una barra litoral, los aluviones de un río, un batolito granítico, una colada volcánica, etc. De acuerdo a lo anterior se considera acuífero a unidades o formaciones geológicas compuestas de materiales porosos y permeables.

La conclusión para determinar un acuífero reside en la cantidad de agua que almacena y transmite en cantidades adecuadas para ser explotada para satisfacer una demanda. Llegando más a fondo se clasifica a los acuíferos dependiendo la naturaleza de los materiales que constituyen y su posible alteración o afectación estructural: logrando diferenciarlos entre acuíferos porosos, kársticos y fisurados. Aunque también más a menudo estos se clasifican dependiendo de su función estructural y las presiones que soporta, distinguiendo libres de confinados.

En el caso del acuífero libre o también considerado freático se considera a aquel en el que el agua subterránea que se contiene se mantiene en contacto con la atmósfera por medio de poros o cavidades existentes en la zona no saturada. Suelen presentarse ocasiones en las que los pozos penetran a grandes profundidades en áreas en las cuales se identifican irregularidades en las cuales el nivel de saturación llega eventualmente a rebasar la superficie del terreno.



Figura 2.4 Tipos de acuíferos (Fuente: Hernández, 2018).

El acuífero confinado tiene particularidades en las cuales el agua de la unidad rocosa en cualquier punto de se encontrara a una presión atmosférica mayor, por lo cual al momento de realizar perforaciones en estas unidades tendera ascender al agua a través de la fisura hasta que la presión del acuífero sea igual a la de la atmosfera. Algunas otras de las características distintivas son que están separados por materiales impermeables o confinantes consecuente a unidades que soportan presiones ejercidas por el mismo peso, en el cual los poros albergan más agua que el volumen correspondiente, ejerciendo mayor compresión en los poros.

Cabe considerar que se encuentra entre dos capas de materiales impermeables las cuales impiden su transmisión o traspaso de agua hacia otro acuífero. En otro caso los acuíferos semiconfinados son los constituidos por una cubierta de un acuitardo el cual le da características impermeables pero por su otra cubierta se encuentra en muchas ocasiones una cubierta permeable que permite el transito del agua entre acuíferos.

2.2.3.2 Antecedentes hidrogeológicos del área de estudio

El área de estudio está ubicada en el centro del Acuífero del Valle de Toluca (AVT) (figura 2.5). Las características hidrogeológicas del AVT desde un aspecto regional muestra que es un acuífero multicapa constituido por diferentes capas superpuestas (Expósito, 2012), aunque la continuidad hidráulica permite considerarlo como un sistema de flujo único, con diferencias de carga hidráulica (trabajo de Ariel Consultores, S.A., 1996 en Expósito, 2012). De acuerdo con el trabajo de CONAGUA (2009), en el acuífero se consideran dos unidades acuíferas, la primera unidad es un medio poroso y la segunda rocas volcánicas con fracturamiento. El medio poroso es caracterizado por depósitos clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del Valle de Toluca, dicha permeabilidad varía dependiendo de la granulometría. El medio fracturado se relaciona a rocas volcánicas fracturadas con una permeabilidad secundaria (CONAGUA, 2009).

De acuerdo con el trabajo de Ariel Consultores, S.A., (1996) citado en Expósito, (2012), la parte superior del AVT es de naturaleza porosa comportándose como un acuífero libre, que se sitúa sobre una capa de tobas de baja permeabilidad que se

comportan como un acuitardo, que separan al medio poroso del fisurado actuando como una barrera confinante. El medio fisurado funciona a su vez como un acuífero confinado o semiconfinado hablando hidráulicamente.

Las unidades hidrogeológicas para el área de estudio de acuerdo al medio en el que se consideraron (Expósito, 2012) (figura 2.4) comprenden:

Medio Poroso: Qpla (depósitos lacustres) y Qpvc (flujos piroclásticos del Nevado de Toluca).

Medio Fracturado o fisurado: Qpv (Derrames de lava de composición basáltica y andesítica), Qhv (derrames de lava andesítica, basáltica y dacítica) y Tmv (complejo volcánico de andesitas, basaltos).

La unidad considerada como acuitardo entre los acuíferos: Qal (depósitos aluviales).

Los pozos de agua subterránea en general se ubican hacia los alrededores de los volcanes de la zona centro de Toluca (área de estudio de este trabajo) de acuerdo al trabajo de Expósito (2012). En esta zona las rocas de estos volcanes y en base a la geología de IFOMEGEM (2009) fueron consideradas desde el punto de vista hidrogeológico por Expósito (2012) como zonas de baja permeabilidad y presentando fronteras impermeables y solo en ocasiones con presencia de permeabilidad secundaria en fracturas. En el estudio de Expósito (2012) y en relación con el área de estudio de este trabajo se muestra que los flujos de agua subterránea a distintos niveles de profundidad en Almoloya de Juárez van hacia el norte, en la zona donde se ubica el río Tejalpa los flujos van al Noreste, en Calixtlahuaca van hacia el Noreste y en la Ciudad de Toluca van al Noreste y Este. Al observar los estudios de flujo de agua subterránea y áreas de abatimiento del trabajo de Expósito (2012), los volcanes del centro de Toluca parecen actuar como una zona de bifurcación o de cambio de dirección del agua subterránea y como una zona de barrera litológica para el caso de los abatimientos.

En el poniente del área de estudio y que abarca parte de las laderas del Nevado de Toluca y Volcán San Antonio fueron cartografiadas por IFOMEGEM (2009) como

rocas piroclásticas y estas fueron consideradas con las claves Qpvc y Qpv, estas rocas desde el punto de vista hidrogeológico son consideradas por CONAGUA-Desarrollo y Sistemas S.A. (2005) como unidades de recarga debido a su nivel topográfico que propicia la infiltración de lluvia y de escurrimientos superficiales que funcionan como acuíferos someros. La recarga que recibe la parte del acuífero del área de estudio establecida viene principalmente de las faldas y pie de monte del Nevado de Toluca (CONAGUA - Desarrollo y Sistemas S.A., 2005).

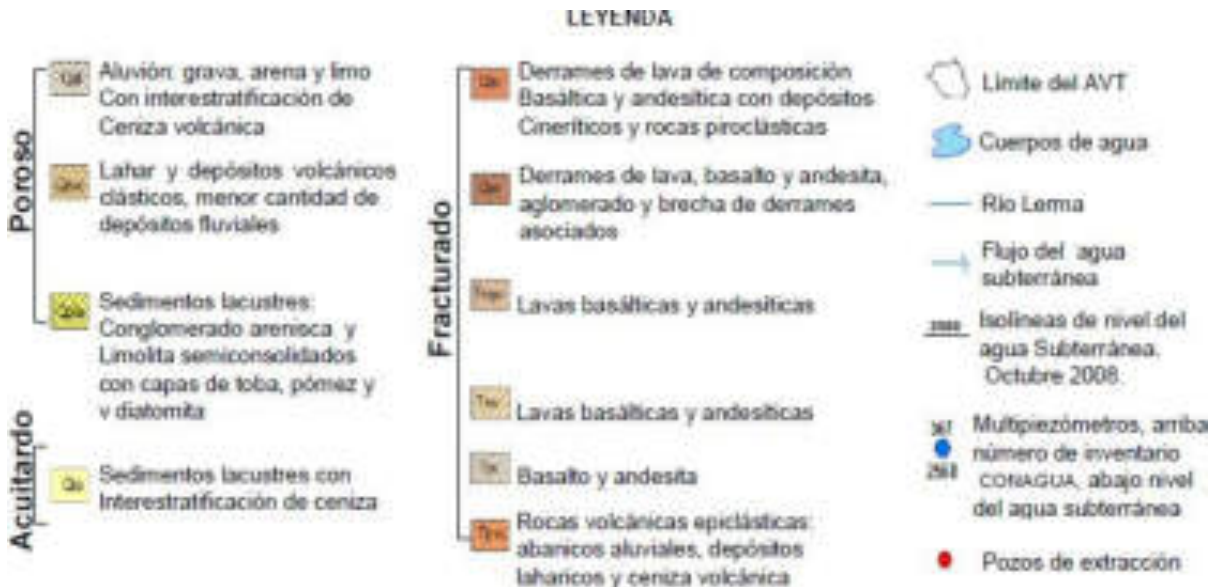
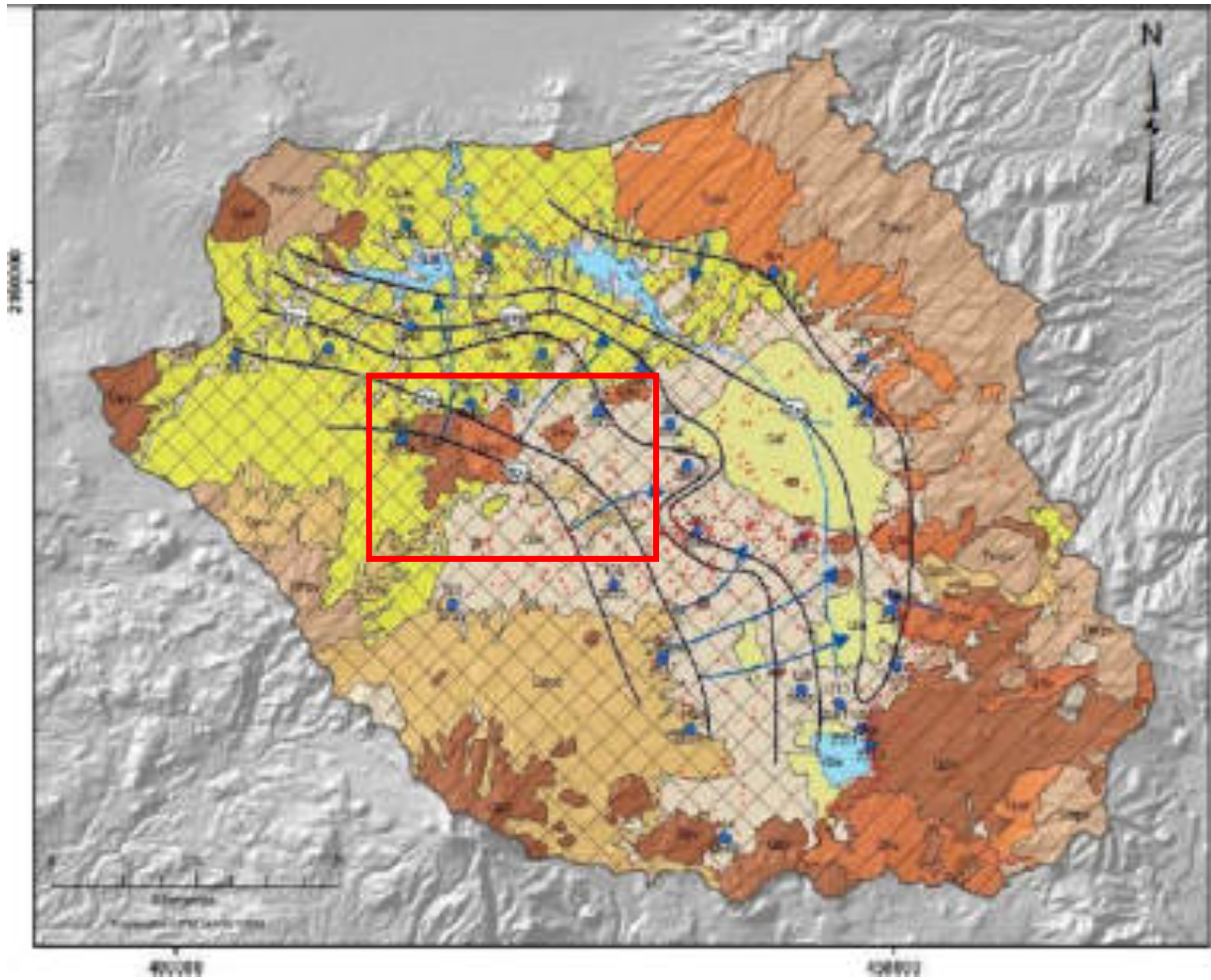


Figura 2.5 Mapa hidrogeológico del Acuífero del Valle de Toluca (Fuente: Espósito, 2012).

Capítulo 3. Geología ambiental de los volcanes de la zona Centro-Oeste de Toluca

En este capítulo se expone la geología y geología ambiental de la zona de estudio en específico comprende la estratigrafía, geología estructural y geología ambiental. La estratigrafía comprende la definición de las unidades geológicas de una manera informal. La geología estructural la definición de las estructuras de deformación importantes como fracturas y fallas y la geología ambiental define rasgos geológico-ambientales como peligros y riesgos geológicos identificados en el área de estudio.

3.1 Estratigrafía

La estratigrafía del área de estudio está basada en cartografía geológica de campo y comprende a los municipios de Toluca, Almoloya de Juárez y Zinacantepec. La geología se muestra en el mapa geológico que es mostrado en la figura 3.1. El mapa geológico muestra la distribución de las estructuras volcánicas definidas, también se muestran con motivo de una identificación más simplificada en el mapa de ubicación de las estructuras volcánicas (anexo 1), en este trabajo de igual manera se muestran las localizaciones de los puntos de muestreo (Anexo 3). La tabla 3.1 muestra la columna estratigráfica del área de estudio y que tiene relación directa con el mapa geológico.

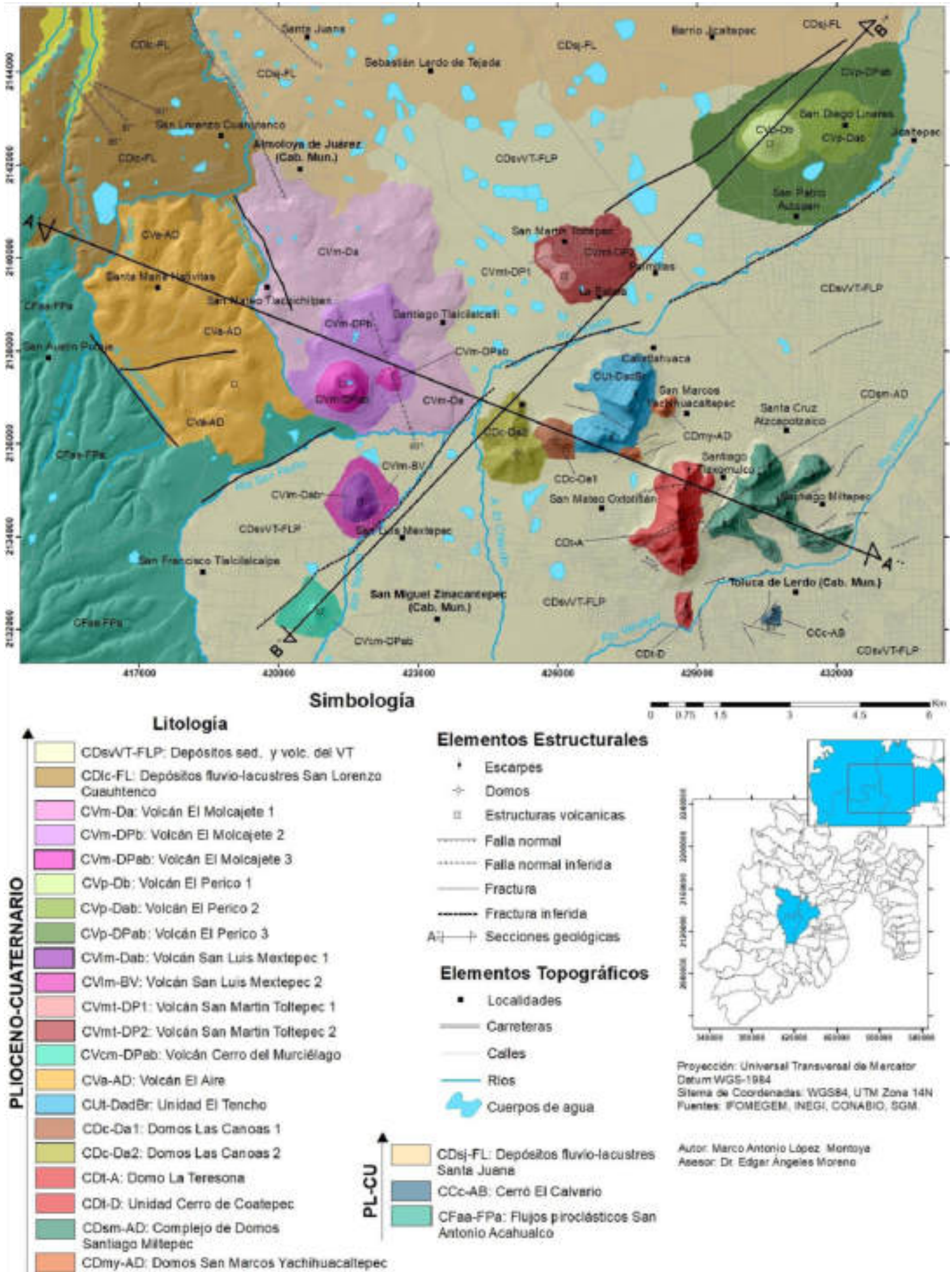


Figura 3.1 Mapa geológico del área de estudio, elaborado con geología de campo y usando datos de apoyo de CONABIO, INEGI, IFOMEGEM, SGM.

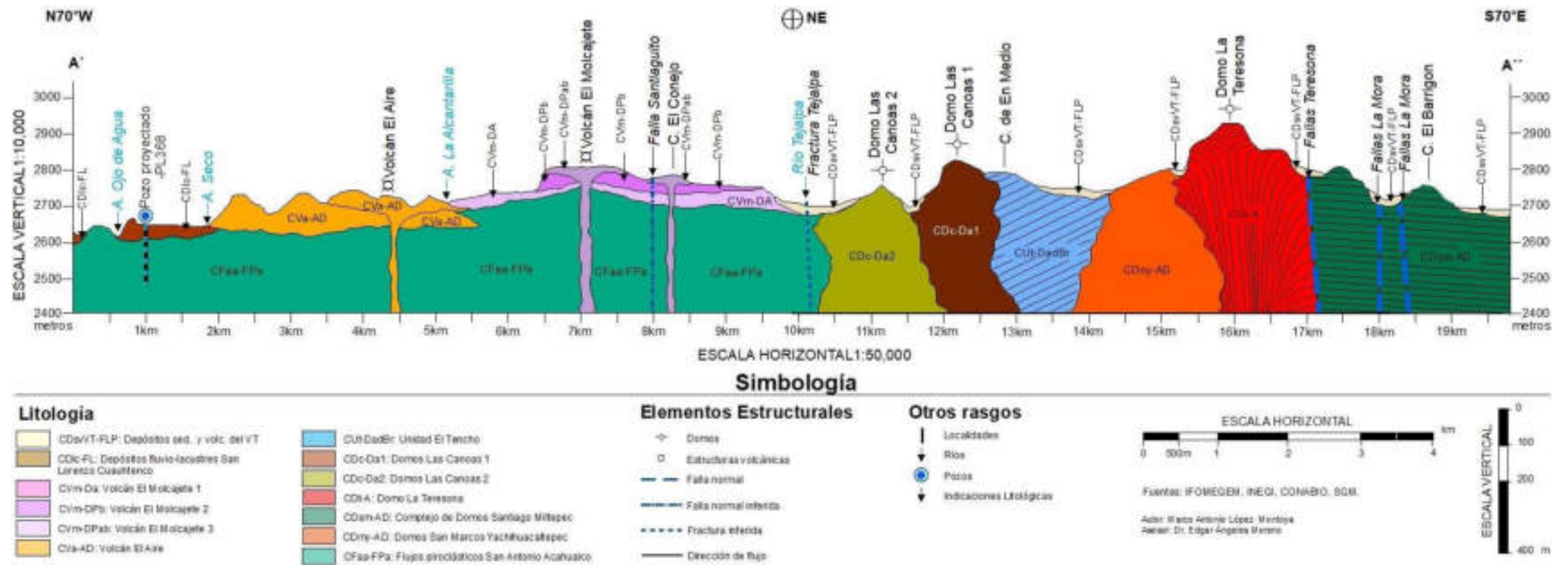
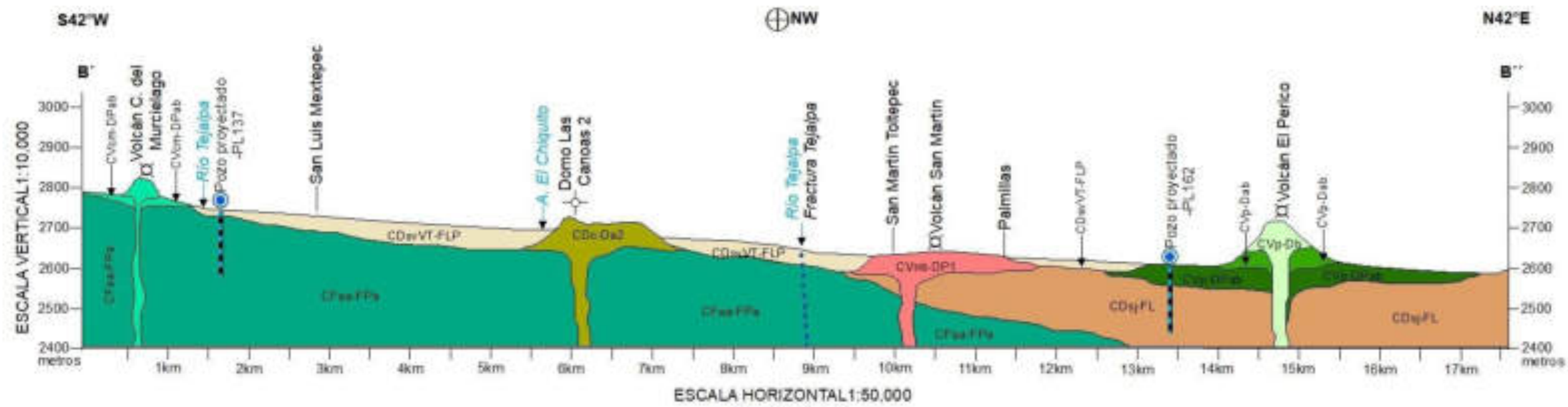


Figura 3.2 Sección Geológica A'-A''



Simbología

Litología

- CDavVT-FLP: Depósitos sed. y volc. del VT
- CVp-Op: Volcán El Perico 1
- CVp-Oab: Volcán El Perico 2
- CVp-OPab: Volcán El Perico 3
- CVm-OP2: Volcán San Martín Tollepec
- CVcm-OPab: Volcán Cerro del Murciélago
- CDc-Oa2: Domo Las Canoas 2
- CDsj-FL: Depósitos fluvio-lacustres Santa Juana
- CFaa-FFa: Flujos proclásticos San Antonio Acahuatl

Elementos Estructurales

- ⊕ Domo
- Estructuras volcánicas
- - - - Fractura inferida

Otros rasgos

- | Localidades
- ↓ Río
- Pozos
- ↓ Indicaciones Litológicas



Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO, SGM.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Angeles Moreno



Figura 3.3 Sección Geológica B'-B''

Tabla 3.1 Columna estratigráfica

Edad	Litología	Nombre de la unidad	Descripción
PLIOCENO-CUATERNARIO	CDsvVT	FLP Depósitos sedimentarios y volcánicos del VT - CDsvVT-FLP	FLP: Depósitos fluvio-lacustres y depósitos piroclásticos
	CDlc	FL Depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuautenco - CDlc-FL	FL: Depósitos fluvio-lacustres
	CVm	Da DPb DPab Volcán El Molcajete - CVm-Da - CVm-DPb - CVm-DPab	Da: Derrames andesíticos DPb: Depósitos piroclásticos basálticos DPab: Depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos
	CVp	Db Dab DPab Volcán El Perico - CVp-Db - CVp-Dab - CVp-DPab	Db: Derrames de basaltos Dab: Derrames andesíticos-basálticos DPab: Depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos
	CVIm	Dab BV Volcán San Luis Mextepec - CVIm-Dab - CVIm-BV	Dab: Derrames andesíticos-basálticos BV: Brecha volcánica
	CVmt	DP1 DP2 Volcán San Martín Toltepec - CVmt-DP1 - CVmt-DP2	DP1: Depósitos piroclásticos 1 DP2: Depósitos piroclásticos 2
	CVcm	DPab Volcán Cerro del Murcielago - CVcm-DPab	DPab: Depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos y brecha volcánica
	CVa	AD Volcán El Aire - CVa-AD	AD: Andesitas y dacitas
	CUt	DadBr Unidad El Tencho - CUt-DadBr	DadBr: Derrames andesíticos y dacíticos, brechas volcánicas andesíticas y dacíticas
	CDc	Da1 Da2 Domas las Canoas - CDc-Da1 - CDc-Da2	Da1: Derrames andesíticos Da2: Derrames andesíticos
	CDt	A D Domo la Teresona - CDt-A - CDt-D	A: Andesitas D: Dacitas
	CDsm	AD Complejo de Domos Santiago Miltepec - CDsm-AD	AD: Andesitas y dacitas
	CDmy	AD Domas San Marcos Yachihuacaltepec - CDmy-AD	AD: Andesitas y dacitas
	CCc	AB Cerro El Calvario - CCc-AB	AB: Andesitas y basaltos
	CDsj	FL Depósitos fluvio-lacustres Santa Juana CDsj-FL	FL: Depósitos fluvio-lacustres
	CFaa	Fpa Flujos piroclásticos San Antonio Acahualco - CFaa-Fpa	Fpa: Flujos piroclásticos andesíticos

3.1.1 Flujos piroclásticos San Antonio Acahualco (CFaa-FPa)

Estos flujos están distribuidos hacia las laderas de la parte NE del Volcán Nevado de Toluca, en laderas del oriente del Volcán San Antonio que comprende a poblaciones como San Francisco Tlalcilcalpan, San Antonio Acahualco y Santa María, y están caracterizados en este trabajo como la unidad más antigua del área de estudio cubriendo una parte importante de la parte poniente del área de trabajo y que está a profundidad inferido a partir de la columna estratigráfica.

Los depósitos piroclásticos comprenden una secuencia de flujos piroclásticos con bloques y ceniza, flujos de pómez y ceniza, depósitos de caída y oleadas piroclásticas. Las partículas volcánicas y clastos volcánicos son de andesita y dacita con texturas porfídicas. En algunas partes se observaron paleosuelos estratificados y depósitos de pómez y ceniza; estos depósitos son cubiertos por suelos recientes con espesores que no superan los 0.5 m. Estos suelos a su vez cubren paleosuelos de color café oscuro de cerca 1 m de espesor aproximadamente, bajo estas dos capas se ven presente capas de grandes volúmenes que se componen de pómez de color gris-café claro y cenizas. En algunos cortes geológicos de aproximadamente 15 m de altura que fueron realizados por la industria minera de la zona, encargándose de la venta de materiales pétreos; en estos cortes se observaron unidades de flujos piroclásticos (figura 3.4), oleadas piroclásticas y depósitos de caída, y en la parte superior depósitos fluviales.

La edad que se infiere para los flujos piroclásticos San Antonio Acahualco es equivalente a 3.2 Ma (García-Palomo, 1998 en García-Palomo et al., 2000) esto porque García-Palomo fechó el volcán San Antonio en ca. De 3.2 Ma y CFaa-FPa son productos de este volcán.



Figura 3.4 Depósitos piroclásticos San Antonio Acahualco.

3.1.2 Depósitos fluvio-lacustres Santa Juana (CDsj-FL)

Los depósitos fluvio-lacustres Santa Juana afloran al noreste de Almoloya de Juárez y al oeste de Temoaya adquiere el nombre de la comunidad más representativa del área de trabajo. La unidad es limitada en Almoloya de Juárez por derrames lávicos del volcán El Molcajete y unidad se extiende hasta cerca del poblado de San Pablo Autopan (figura 3.1).

Los depósitos cercanos al río Almoloya se caracterizan por estar sobreyaciendo flujos piroclásticos con clastos mal clasificados, subangulosos y angulosos de composición andesítica. Los depósitos son limos arcillosos con y gravas dispersas a las cuales le sobreyacen capas de paleosuelos con espesores de 0.5 m, posteriormente se identifica una capa de limos arenosos intercalados con limos arcillosos, finalmente como superficie la unidad tiene un compuesto de gravas con matriz de arenas en mínima presencias (figura 3.5).

La figura 3.6 presenta a la unidad de depósitos fluvio-lacustres Santa Juana sobreyaciendo a depósitos piroclásticos de un lahar. Estos lahares están compuestos de bloques de tamaño desde arenas, gravas hasta bloques con una clasificación mala y de composición andesítica. Los depósitos de gravas, arenas y limos de la unidad Santa Juana sobreyacen a los lahares y los estratos presentan espesores menores a los 30 cm los cuales se ven cubiertos por suelos de reciente formación.

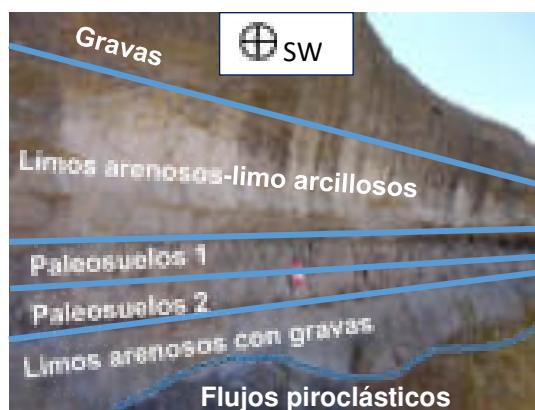


Figura 3.5 Secuencia de unidades estratificadas en antigua mina.



Figura 3.6 Secuencia de unidades estratificadas en corte de tiradero.

3.1.3 Cerro El Calvario (CCc-AB)

El cerro El Calvario es una estructura volcánica ubicada en el centro de la Ciudad de Toluca y es un parque que toma el nombre El Calvario (figura 3.1). Es una estructura volcánica de tipo domo volcánico que presenta derrames de lava-domo y brechas volcánicas de composición que varía de andesíticos a basálticos. Estas rocas presentan texturas afaníticas y porfídicas. En la parte norte de los afloramientos se evidencian escarpes (figura 3.7). Los derrames lávicos son cubiertos por brechas volcánicas con espesores de 10 m aproximadamente; las brechas presentan clastos subangulosos de andesita con tamaños que van de los 0.5 m a 1 m de dimensiones y en unas partes la brecha en fracturas u oquedades presenta limonitas y arcillas (figura 3.8).

En afloramientos de la parte superior del cerro se presentan algunos depósitos piroclásticos compuestas principalmente de cenizas de color gris claro con clastos erráticos de andesita (figura 3.8). En la parte más alta del de los derrames y parte alta del cerro aparecen brechas volcánicas (figura 3.9 y 3.10).

Respecto a la geología estructural las rocas del Cerro El Calvario son afectadas por la falla Cerro del Calvario con orientación NE-SW la cual se expresa por la presencia de abundantes fracturas las cuales se rellenan de limos y arcillas, así como de la materia que compone a la brecha volcánica y al flujo andesítico (figura 3.11 y 3.12), ordenándose fracturas en el mismo cuerpo con orientación similar a la falla (figura 3.10).

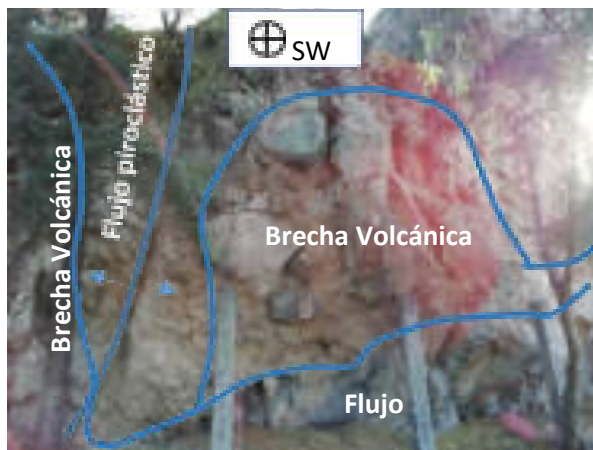


Figura 3.7 Parte derecha de corte (visto en dirección N-S) que muestra fracturamiento.

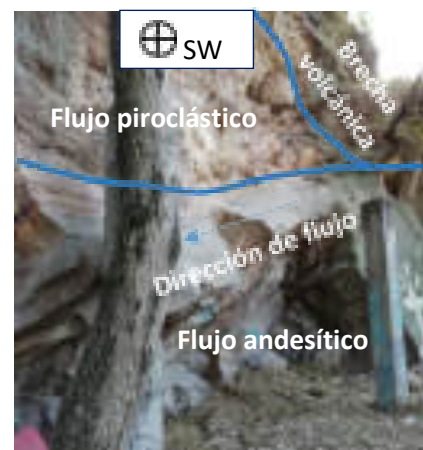


Figura 3.8 Parte izquierda del corte, se aprecia la dirección de flujo SE.

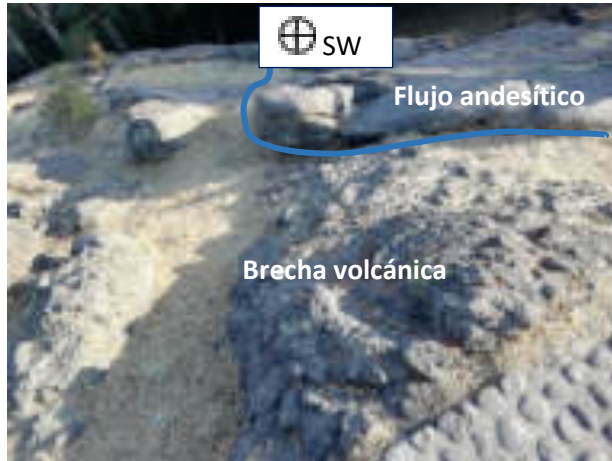


Figura 3.9 Afloramiento de brecha volcánica que intrusión a derrame volcánico.

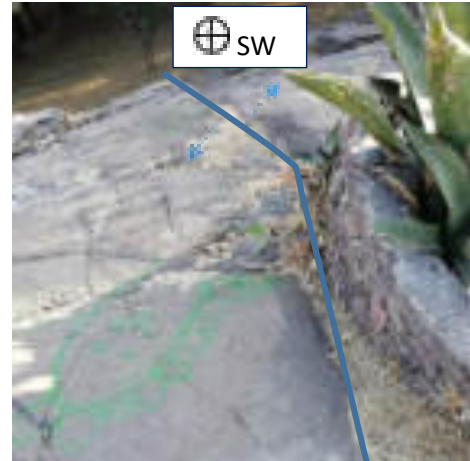


Figura 3.10 Fractura en flujo andesítico del lado derecho dirección NE-SW.

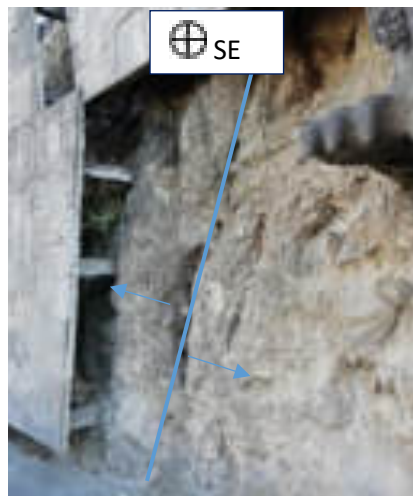


Figura 3.11 Fractura geológica que corta a brecha volcánica y flujos andesíticos.

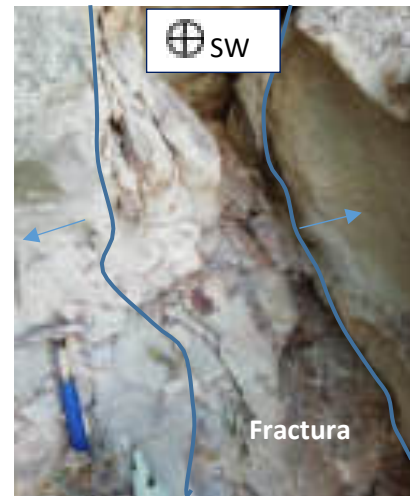


Figura 3.12 Fractura en corte geológico, se encuentra rellena de materiales de composición del domo.

3.1.4 Domos San Marcos Yachihuacaltepec (CDmy-AD)

Los domos de San Marcos Yachihuacaltepec se componen de dos afloramientos de los cuales el de mayor volumen se ubica al centro del poblado que lleva el mismo nombre, mientras el segundo se encuentra ubicado al Sur en cercanías del parque Sierra Morelos. Ambos afloramientos volcánicos se ubican al Este de la Unidad El

Tencho, distanciados del centro de la ciudad de Toluca a una distancia promedio de 4.2 km al Noroeste (figura 3.1).

Los afloramientos de los domos están constituidos de derrames andesíticos y dacíticos con textura porfídica con fenocristales de feldespatos en una matriz de vidrio volcánico. En algunos afloramientos se observó una estructura volcánica de lineamientos y flujo laminar que son cortados por vetillas de óxidos de hierro (figura 3.13). En la cima de la estructura dómica hay cambios de la estructura en derrames a autobrechas volcánicas compuestas de andesitas vesiculosas con textura porfídica y una matriz vítrea (figura 3.14).

El afloramiento de los domos ubicado en el parque Sierra Morelos presenta unidades de flujo de lava-dome estratificado con autobrechas y que son cortadas por fracturas con orientación SE-NW. Los bandeamientos de flujo lávico contienen clastos de andesitas y dacitas con estructura de rompecabezas que se interpreta como cambios de volumen durante enfriamiento de los flujos lávicos (figura 3.15).



Figura 3.13 Lineamientos de flujo laminar.



Figura 3.14 Autobrechamiento de andesitas vesiculosas con matriz vítrea.



Figura 3.15 Estructura de rompecabezas presentes en clastos dentro de flujos de lava-dome.

3.1.5 Complejo de domos Santiago Miltepec (CDsm-AD)

El complejo de domos Santiago Miltepec se compone de varias secuencias de domos y que se reflejan en productos volcánicos que tienen una expresión topográfica en varios cerros. Las secuencias volcánicas de los domos de Santiago presentan características litológicas similares, en conjunto tienen una altitud topográfica máxima aproximada 2858 msnm y se ve ubicado como se muestra en la figura 3.1 del mapa geológico. Los afloramientos están limitados al Norte por la colonia Santa Cruz Atzacapotzalco y al Sur por el centro del municipio de Toluca. La litología que presentan las secuencias de estos domos son rocas andesíticas y dacíticas con textura porfídica y afanítica, presentan fenocristales de plagioclasas, anfíboles y a veces cuarzo en una matriz de vidrio volcánico. En el Cerro Agua Bendita se observaron flujos volcánicos andesítico-dacíticos con diaclasas; estos flujos presentan brechas volcánicas con clastos de composición andesítica, tienen un espesor de 5 metros aproximadamente al que se sobreponen en algunas zonas depósitos piroclásticos (figura 3.16, 3.17 y 3.18). Las características estructurales que presentan son fracturas que cortan los bloques de andesita verticalmente siempre que el flujo se encuentra en posición horizontal el ejemplo de las fracturas presentes tienen orientaciones NW-SE (figura 3.16) y NE-SW (figura 3.17), mientras que los flujos tienen un rumbo NE-SW $74^{\circ}/30^{\circ}$ SE (figura 3.19 Y 3.20).

Los cambios de dirección de flujo en este conjunto de estructuras son muy cambiantes ya que en distancias de solo metros se pueden invertir totalmente, por otro lado la estructura de flujo de los derrames lávicos de los domos cambia en orientación repetidamente. Los derrames lávicos cambian de estructura masivas a derrames con abundantes diaclasas. Los depósitos piroclásticos que se identificaron son depósitos de ceniza volcánica de color gris claro que se depositó al mismo tiempo que los flujos de brechas y derrames volcánicos y que los clastos en brechas volcánicas son angulosos de andesita, con tamaños de 0.5 cm a medio metro (figura 3.21).



Figura 3.16 Flujo andesítico con presencia de fractura, figura 1 de 3 de secuencia estratigráfica.

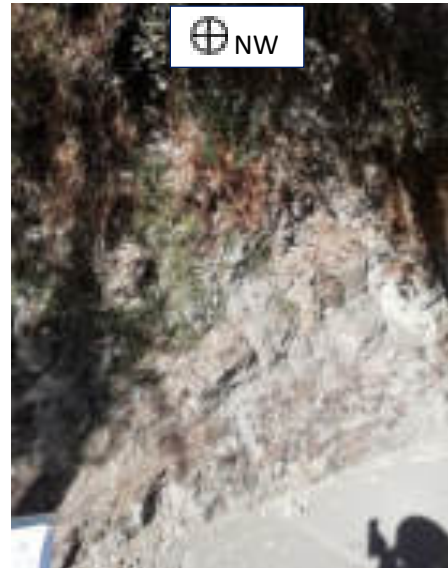


Figura 3.17 Brecha volcánica figura 2 de 3 de secuencia estratigráfica.



Figura 3.18 Flujo piroclástico, figura 3 de 3 de secuencia estratigráfica.



Figura 3.19 Flujo andesítico con presencia de fractura estructural.

En las figuras 3.22, 3.23 y 3.24 se aprecia un corte geológico con una secuencia transversal que tiene como base brechas volcánicas a la que se sobrepone un flujo andesítico con estructura de diaclasas que a su vez se encuentra recubierto por otro evento de brecha volcánica, en conjunto la estratificación de capas tienen un espesor de 15 m de altura extendiéndose por 100 m en dirección Este.



Figura 3.20 Flujo andesítico.



Figura 3.21 Flujo piroclástico con clastos de andesita y matriz de ceniza volcánica.



Figura 3.22 Corte geológico muestra capa inferior de brecha volcánica a la cual se sobrepone el flujo andesítico, figura 1 de 4.

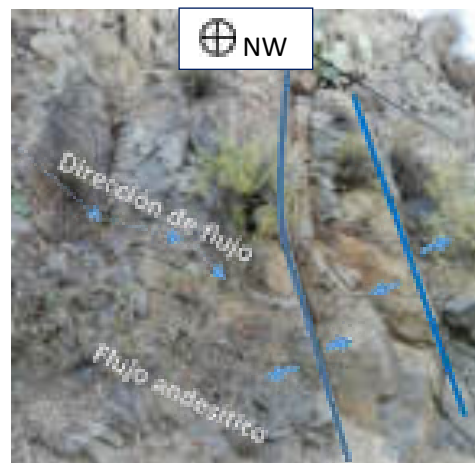


Figura 3.23 Corte geológico muestra capa de flujo andesítico, figura 2 de 4.



Figura 3.24 Corte geológico parte brecha volcánica a la cual continúa flujo andesítico, figura 3 de 4.



Figura 3.25 Corte geológico de flujo andesítico, presenta fractura e hidrotermalismo figura 4 de 4.



Figura 3.26 Muestra de ceniza soldada que rellena fractura que se muestra en la figura 3.25.



Figura 3.27 Brecha de falla en flujo andesítico.

El flujo andesítico 1 de la figura 3.23 tiene una actitud estructural NW-SE y que es afectado por fracturamientos cruzados NW-SE y NE-SW. Las unidades de flujos andesíticos con orientaciones NW-SE, continúan a nivel vertical y son cortados por una fractura con la misma orientación la cual se encuentra separada por 50 cm y esta rellena de arcillas color gris claro con manchas de color rosa, soldada evidenciando procesos antiguos de hidrotermalismo (figura 3.25 y 3.26). En la figura 3.27 sobre los límites de afloramientos rocosos en el Cerro Agua Bendita se presenta una brecha de falla, evidenciada por la forma de fracturamiento en los flujos andesíticos que marcan la presencia de fallas.

En los afloramientos ubicados en el Cerro El Obispo presentan flujos andesíticos con bloques de andesita-dacita con textura porfídica. Otros afloramientos presentan flujos de andesitas con estructura de diaclasas curvadas y pliegues de flujo que se generan durante el flujo de la lava, la cual se dobla por el empuje del mismo (figura 3.28). Los flujos tienen actitudes estructurales de $34^{\circ}/19^{\circ}\text{NE}$, $17^{\circ}/10^{\circ}\text{NE}$ y $203^{\circ}/31^{\circ}\text{NW}$. Los flujos se ven cubiertos por brechas volcánicas que en algunas secciones o cortes de afloramientos aumentan su presencia y disminuye la presencia de los flujos andesíticos (figura 3.29).

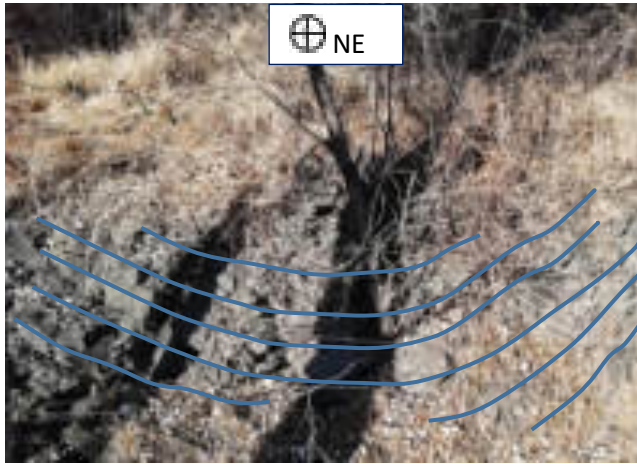


Figura 3.28 Flujo andesítico en forma de diaclasas formando pliegue en semicírculo.

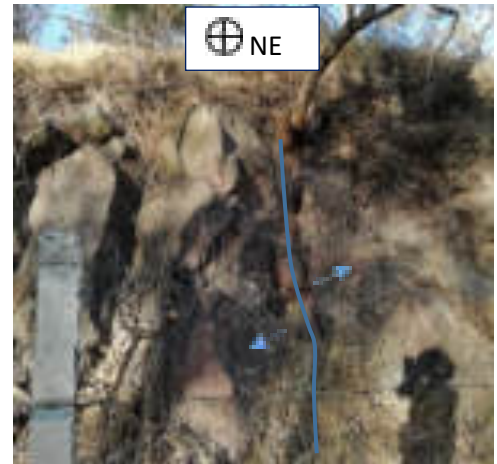


Figura 3.29 Flujo andesítico con estructura de bloques con presencia de fracturas escasas.

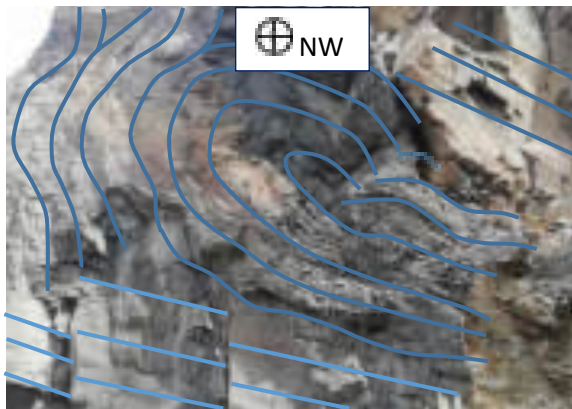


Figura 3.30 Flujos andesíticos con múltiples plegamientos, flujos con estructura de diaclasas y de bloques.

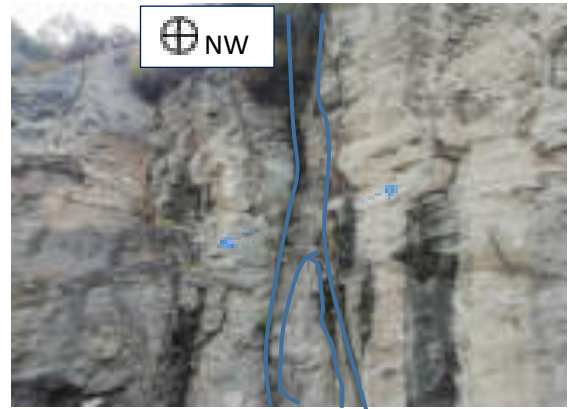


Figura 3.31 Flujo andesítico con presencia de fracturas rellenas de cenizas.

En la parte Oriente de los afloramientos de los domos Santiago se presentan flujos lávicos que toman diferentes orientaciones aparentando que estos se cruzan (figura 3.30). En estos afloramientos la roca es andesita y presentan fracturas rellenas de arcillas y limos y fragmentos de roca angulosos en ocasiones (figura 3.31).

En los afloramientos rocosos de la parte superior a los domos se observan flujos de lava con flujos de brechas volcánicas autobrechadas de composición andesítico-dacítica (figura 3.1). Los flujos lávicos tienen una misma dirección en varios de los afloramientos observados (dirección de flujo: NE-SW) (figura 3.32); estos

afloramientos forman escarpes que son una expresión de las terminaciones de los derrames y que tienen orientaciones estos derrames de rumbo NW-SE (Figura 3.33). En la parte alta de afloramientos se hace evidente que la brecha volcánica está distribuida en partes internas de derrames y en partes superiores (figura 3.34). Algunas brechas volcánicas parecen ligadas a intrusiones subvolcánicas o son brechas de fallas ya que se observó una fractura que se encuentra rellena del material de la brecha con una separación de medio metro a los 2 metros de ancho (figura 3.35).



Figura 3.32 Flujos andesíticos del Cerro el Barrigón.



Figura 3.33 Flujos andesíticos presentes en escarpe.



Figura 3.34 Brechas volcánicas que cubren parcialmente la cima del Cerro El Barrigón.



Figura 3.35 Fractura por la cual emerge brecha volcánica sobre los flujos de andesita, la fractura presenta vestigios de hidrotermalismo.

3.1.6 Domo La Teresona (CDt-A)

El Domo la Teresona, también conocido como Cerro la Teresona desde el punto de vista geográfico, tiene una elevación de 2990 msnm y se ubica a 2.7 km del centro de Toluca. Esta estructura volcánica se encuentra entre las poblaciones de San Marcos Yachihuacaltepec y la colonia San Mateo Oxtotitlán. Sus rocas son consideradas como andesita-dacita en la cartografía de la carta geológica minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2002).

En este trabajo el domo La Teresona está definido como una estructura volcánica de un domo de composición andesítico y dacítico con textura porfídica presentando cristales de plagioclasas, cuarzo, anfíboles y epidota-clorita., (figura 3.36 y 3.37). Otras estructuras que se identificaron son derrames de tipo lava-domo con orientaciones NW-SE. La presencia de fracturas son muy comunes (Clv de punto T2) y siguen patrones geométricos regulares. En los afloramientos del domo ubicados en partes superiores los derrames de lava se observaron con estructuras de flujo y líneas de flujo con actitudes estructurales de $85^{\circ}/23^{\circ}\text{SW}$ (figura 3.38 y 3.39).

En la parte media de la estructura dómica, los sistemas de fracturas son más frecuentes (Clv de punto T5-AB), y aparecen escarpes en donde se encuentran las zonas de fracturas (figura 3.40 y 3.41).



Figura 3.37 Dacita porfídica con gran presencia de cuarzo y plagioclasas.

Figura 3.36 Afloramientos de flujos de dacita.

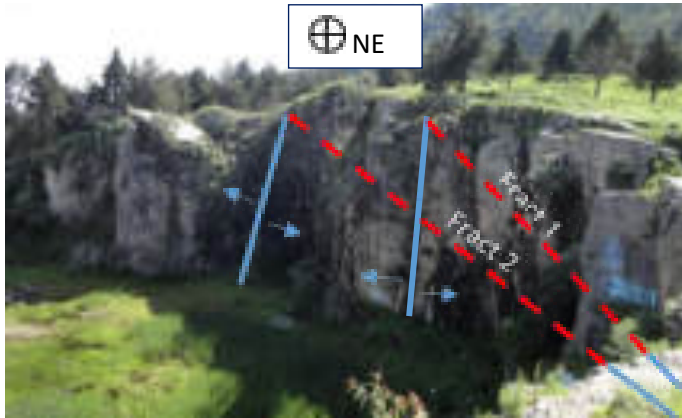


Figura 3.38 Fracturas geológicas en cortes de roca, vestigios de antiguas minas de materiales pétreos.



Figura 3.39 Fracturas evidentes al lado SW, contrario a la figura 3.38.



Figura 3.40 Sistemas de fracturas en escarpes de derrames lávicos, hacia sus partes bajas generan deslizamientos de tierra.

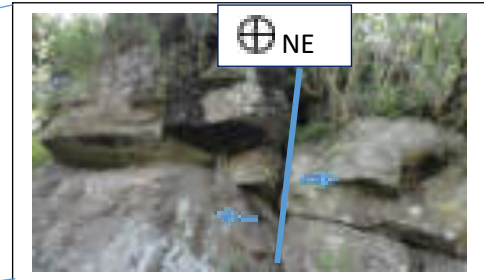


Figura 3.41 Fracturas que se muestra en la figura 3.40 sobre el flanco SW del escarpe.



Figura 3.42 Fracturamiento en cortes geológicos de antiguas minas de materiales pétreos, generan inestabilidad en laderas.



Figura 3.43 Cambio de dirección en el flujo de lava del flanco E de la estructura.

En la cima del domo se observaron direcciones de flujo se encuentran orientadas en dirección NE-SW (figura 3.43). Los sistemas de fracturas son más notorios y aparecen al cambiar la estructura volcánica de los derrames de flujos a estructura masiva (figura 3.42). En la mayoría de los sistemas de fracturas se identificó orientaciones acordes a orientaciones con las fallas que se registran en la zona (figura 3.44 y 3.45).

En este trabajo se reconoce que el domo La Teresona está relacionado espacialmente con las unidades de flujos lávicos y de flujos de brechas volcánicas de El Cerro de Coatepec y la unidad El Tencho, ya que las composiciones de las rocas son similares y las actitudes estructurales de las capas de rocas y flujos lávicos parten de una parte central que coincide con la ubicación del domo La Teresona. Los datos de este trabajo sugieren que hubo colapsos y destrucciones de varios domos volcánicos en el lugar donde se encuentra el domo La Teresona y que La Teresona fue el último domo en formarse.

De acuerdo a la carta geológico-minera del SGM (2002), las rocas del domo no tienen una edad específica ya que el estudio realizado por el SGM abarca un área mucho más extensa y no define una edad específica para el caso del domo La Teresona. En este trabajo se considera una edad Plio-Cuaternaria para esta estructura volcánica con base en la cartografía geológica y la definición de la columna estratigráfica (Tabla 3.1).

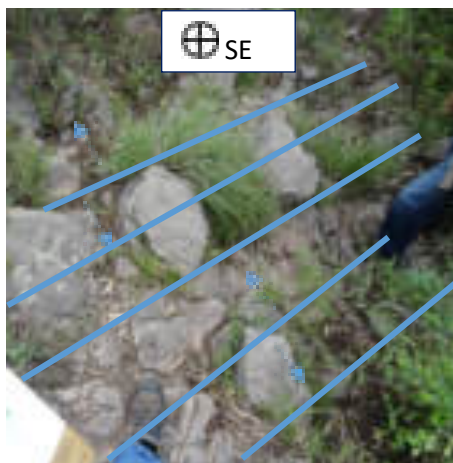


Figura 3.44 Sistemas de fracturas dirección NE.



Figura 3.45 Sistemas de fracturas dirección NE cortando a flujos de lava.

- **Unidad Cerro Coatepec (CDt-D)**

El Cerro de Coatepec cuenta con una altura de 2747 msnm, y está ubicado al Norte de la colonia de San Buenaventura y al Sur del Domo la Teresona como se muestra en la figura 3.1. El Cerro de Coatepec es una estructura volcánica compuesta de unidades de flujo lávicos andesítico-dacíticos intercalados con flujos de brechas volcánicas y es parte de los productos volcánicos de un domo volcánico pero no en sí es un domo volcánico. La unidad Cerro de Coatepec en sus rocas que son afectadas por fracturas y fallas que también fueron identificadas en el trabajo de Almazán-Vázquez (2017).

En la parte alta del Cerro Coatepec aparecen flujos de brechas intercaladas con derrames lávicos de dacita-andesita. Las brechas volcánicas presentan autobrechamiento en sus componentes. En este lugar la unidad se ve con rocas que presentan afloramientos con direcciones N-S (figura 3.46). Los flujos lávicos andesíticos contienen clastos subangulosos del mismo material que tienen un rango de dimensiones de 1 cm a 1 metro. En algunas partes se aprecian gran cantidad de fracturas (figura 3.47), que atraviesan verticalmente al flujo el cual lleva dirección $36^{\circ}/8^{\circ}\text{SE}$.

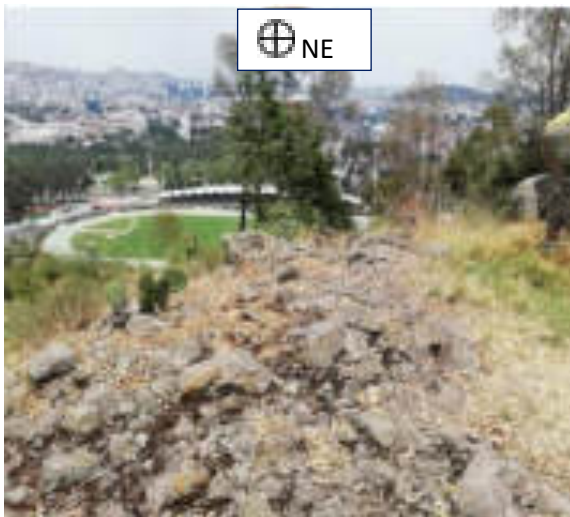


Figura 3.46 Brecha volcánica cortando por el medio flujo de estructura.



Figura 3.47 Fracturas con buzamiento 90° con dirección NE-SW.

En la parte oriente del cerro, se aprecian escarpes que presentan una inclinación de 90° con alturas de 8-9 metros, las fracturas están bien definidas con dirección NE-SW que remarcan la presencia de una brecha de falla que representa la falla Coatepec que pasa por de la zona (figura 3.48 y 3.49).

Las figuras 3.50 y 3.51 corresponden al lado Norte del cerro en el que se observan brechas volcánicas de unos 6 metros de altura con algunas partes con bandeamiento ígneo, con clastos subangulosos pobremente clasificados con un tamaño que va de 5 cm a medio metro. Se observaron presencia de óxidos de hierro y material limoso producto del arrastre de la brecha volcánica.

El Cerro de Coatepec son una serie de derrames lávicos andesítico-dacíticos de tipo lava-domo con intercalaciones de flujos de brechas volcánicas. Estas unidades de flujo volcánicos tienen una inclinación en general al Sur y presentan características litológicas similares a las secuencias volcánicas de la unidad El Tencho. Las rocas del Cerro del Coatepec fueron originadas de un domo volcánico que estaba ubicado en donde se encuentra el actual Cerro de la Teresona. La edad de interpreta del Plio-Cuaternario con base en los resultados de geología de campo.



Figura 3.48 Conjunto de fracturas en afloramiento de macizo rocoso.



Figura 3.49 Brecha de falla justo al lado derecho de la figura 3.33A.



Figura 3.50 Corte geológico, muestra Brecha volcánica con bandeamientos.



Figura 3.51 Ampliación de clastos más pequeños de la brecha volcánica.

3.1.7 Domo Las Canoas (CDc-DA)

El domo Las Canoas está ubicado al Noreste del poblado de San Mateo Oxtotitlán y al Sur de Tecaxic. Algunos afloramientos del domo cuentan con una elevación aproximada de 2900 msnm. En afloramientos de sus partes encuentran flujos lávicos de andesita porfídica. Estos flujos son cubiertos por capas de paleosuelos con presencia de materia orgánica, capas de cenizas intercaladas con suelos y suelos de reciente formación (figura 3.52).

En la parte media del domo se aprecia una morfología de escarpes de rocas andesíticas y dacíticas con estructuras de flujo orientadas NW-SE. Y se observan algunas fracturas que cortan a estos derrames lávicos. En otras partes se observan flujos lávicos estratificados con flujos de brechas volcánicas (Clv de punto SM-15) (Anexo 2).

En la parte oriental del domo Las Canoas se observan unidades de derrames andesíticos (figura 3.53), así como brechas volcánicas compuestas de andesita y niveles con pumicita, y también con presencia de ceniza de color amarillo-grisclaro (figura 3.54 y 3.55). En otras partes se presentan derrames de lava-domo, los cuales se encuentran estratificados con unidades de brechas volcánicas con algunos clastos con estructuras de rompecabezas (figura 3.56 y 3.57).

En la parte sur del domo se identificaron tres capas la capa de depósito piroclástico, luego un paleosuelo y por último un suelo reciente. Estas capas cubren los derrames

lávicos del domo. La capa del depósito piroclástico tiene espesores de 1.5 m que contiene bloques de andesita con pómez y cenizas con espesor de 0.4 m aproximadamente. La capa intermedia se compone de paleosuelos con presencia de bioturbación con un espesor de 0.7 m y la capa superior que se encuentra compuesta de suelos de formación relativamente reciente con presencia de limos arcillosos lo cual amplía su espesor más que algún otro suelo llegando a los 0.4 m aproximados (figura 3.58).



Figura 3.52 Corte estratigráfico de suelos, paleosuelos y derrames de andesita.



Figura 3.53 Derrames de andesita con intercalaciones de brechas.



Figura 3.54 Brechas volcánicas intercaladas con flujos piroclásticos con alto contenido de cenizas.



Figura 3.55 Flujo piroclásticos con un promedio de 87% de ceniza volcánica en su contenido.



Figura 3.56 Capas de derrame con fracturamiento vertical.



Figura 3.57 Unidades de derrames de lava Dome.



Figura 3.58 Unidades de brechas volcánicas, paleosuelos y suelos recientes.

3.1.8 Complejo volcánico Sierra Morelos (CUt)

En este trabajo se define como complejo volcánico Sierra Morelos a las estructuras volcánicas ubicadas dentro del parque Sierra Morelos; este parque se ubica a 4 km del centro de Toluca, colindando al Sur con la colonia de San Mateo Oxtotitlán y al Norte con San Marcos Yachihuacaltepec. El complejo volcánico comprende a El Tencho, Domo San Marcos Yachihuacaltepec, el Domo las Canoas, y domo La Teresona (figura 3.1).

- **Unidad El Tencho (CUt-DadBr)**

La unidad El Tencho toma nombre del cerro El Tencho, y la unidad aflora también en el cerro El Medio, la distribución de la unidad se encuentra colindando al norte con el poblado de Calixtlahuaca y al sur con el parque Sierra Morelos. El cerro El Tencho cuenta con una altitud aproximada de 2800 msnm.

La unidad se encuentra constituida por una secuencia de derrames volcánicos y flujos de brechas volcánicas de andesita y dacita con una textura porfídica que varía en ocasiones a textura afanítica, con colores al intemperismo de tonalidades de gris (figura 3.59 y 3.60). Un color rosado se observó en bandas que puede significar un proceso de combinación de magmas de diferentes composiciones y que se conoce como "Mixing" (figura 3.61), y que también se puede interpretar el proceso como cámaras magmáticas que se encontraban sucias a causa de erupciones anteriores, proceso conocido como "*Replenishment*" (rellenado).

Los afloramientos en el flanco norte de la estructura son unidades de flujos de brechas volcánicas, con clastos de diferentes tamaños pobremente clasificados, cada clasto anguloso y subanguloso en estructura soldada por lava. Estas brechas volcánicas se interpretan como productos de varios colapsos de domos (figura 3.62). En algunos lugares se identificaron manifestaciones hidrotermales que se presentan en fallas que afectan a las brechas volcánicas (15°/82°SE) (figura 3.63).

Sobreponiéndose a los derrames de dacita en partes bajas se encuentran secuencias vulcanosedimentarias de origen lacustre con desarrollo pedogenético en sedimentos compuestos de raíces, cristales, cenizas, paleosuelos con espesores aproximados de 4 metros y rocas volcánicas bien redondeadas (figura 3.64).



Figura 3.59 Bandeamientos y pliegues de flujo en derrames lávicos.



Figura 3.60 Muestra de andesita con manchones rosados posible presencia del proceso Mixing.



Figura 3.61 Bandeamientos de flujo de lava.

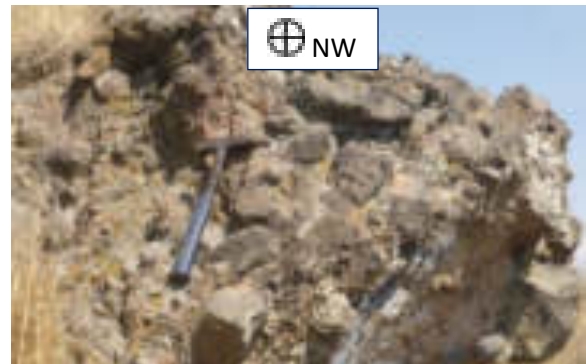


Figura 3.62 Brecha volcánica con clastos de domo volcánico destruido y que están soldados entre sí con lava.



Figura 3.63 Falla con presencia de hidrotermalismo.



Figura 3.64 Secuencias epiclásticas de origen aluvial y fluvial-lacustre

En la parte sur de los afloramientos de la unidad El Tencho (ver mapa geológico de figura 3.1) se encuentran derrames de andesita-basáltica con textura porfídica que tienen una estructura que cambia de masiva a otros derrames de lava más laminares. En el mismo sitio se aprecian flujos de brechas volcánicas con procesos de autobrechamiento volcánico con aproximadas de 6 metros de espesor. En partes bajas se componen limonitas originadas por intemperismo sobre las rocas andesíticas (figura 3.65).

En la parte media de la cartografía de afloramientos de esta unidad se encontraron flujos piroclásticos en bloques con bloques angulosos y subangulosos de andesitas (figura 3.66) mientras que en el límite de los afloramientos de la unidad El Tencho que coincide con zonas bajas se observaron suelos, gravas fluviales, paleosuelos y suelos de formación recientes; estas capas estratificadas y que están sobreyaciendo la unidad El Tencho no rebasan los 5 metros de espesor.

De acuerdo a la carta geológico-minera del 2002 del Servicio Geológico Mexicano la Unidad El Tencho tiene una edad aproximada ubicada en el periodo Terciario. En este trabajo se le asigna una edad relativa del Plioceno-Cuaternario con base en las relaciones de campo (Tabla 3.1).



Figura 3.65 Depósitos de limonitas producto de intemperismo de andesitas.



Figura 3.66 Flujos piroclásticos con bloques de andesita cubiertos de suelos.

3.1.9 Volcán El Aire (CVa-AD)

El volcán Cerro El Aire toma el nombre del cerro El Aire, está formado por derrames lávicos andesítico-basálticos y depósitos piroclásticos. En la base del volcán se identificaron derrames andesíticos y dacíticos que tiene una amplia extensión en los alrededores de Santa María Nativitas. Las rocas de la parte del cono son depósitos piroclásticos con basalto y escoria volcánica basáltica, y luego siguen derrames lávicos andesíticos-basálticos por los alrededores del cono. En Santa María Nativitas se observaron derrames lávicos andesíticos masivos y con diaclasas de enfriamiento, estos derrames parecen ser más antiguos al cono volcánico junto con sus derrames que le acompañaron.

Los afloramientos de los derrames lávicos están limitados por direcciones NW-SE que pueden ser una expresión de las particularidades topográficas de la unidad San Lorenzo Cuauhtenco hacia el Norte y la unidad Acahualco hacia el Sur. Los derrames volcánicos del volcán El Aire están limitados en la parte Noreste por una fractura denominada en este trabajo como Alcantarilla y que es descrita más adelante y en este lugar se pone en contacto derrames lávicos del Volcán El Molcajete (figura 3.1).

3.1.10 Volcán Cerro del Murciélago (CVcm-DPab)

El Volcán Cerro del Murciélago se sitúa al Este a 1.8 kilómetros del centro de la cabecera municipal del municipio de Zinacantepec, y su altitud promedio es de 2816 msnm (figura 3.1). Esta unidad se caracteriza por componerse de depósitos piroclásticos de caída y brechas volcánicas en su totalidad con presencia de bombas volcánicas. Los depósitos piroclásticos se distribuyen a lo largo de las laderas de la estructura volcánica (figura 3.67). Los depósitos piroclásticos son cubiertos por suelos derivados de cenizas volcánicas y alcanzan en algunos lugares 6 m de espesor (figura 3.68).

El volcán Cerro del Murciélago se puede interpretar como un cono piroclástico y cinerítico compuesto de material piroclástico basáltico que presenta muchos óxidos de hierro debido a la cantidad de gases presentes durante su formación. La edad

de la estructura volcánica se considera Cuaternaria con base en sus depósitos están encima de otras unidades volcánicas más antiguas.

3.1.11 Volcán San Martín Toltepec (CVmt)

El Volcán San Martín adquiere el nombre del poblado San Martín que se asienta en el sitio, con una elevación aproximada de 2670 msnm se posiciona al SW de San Pablo Autopan y al NW de Calixtlahuaca (figura 3.1).

El volcán San Martín está formado de depósitos piroclásticos basálticos de caída y de escoria volcánica con oxidación termal, se identificaron abundantes bombas volcánicas en los fragmentos y fragmentos con apariencia “espinosa” y evidencias de estrías de flujo (Figuras 3.69 y 3.70). El volcán San Martín también se puede considerar como un cono cinerítico y monogenético debido a la naturaleza de sus productos volcánicos. La estructura y litología del volcán lo hacen tener semejanza con el volcán Cerro del Murciélago y volcán San Luis Mextepec. Se observaron fracturas NE-SW que cortan a los depósitos piroclásticos.



Figura 3.67 Flujos de brecha volcánica.



Figura 3.68 Flujos de brecha volcánica con paleosuelos sobrepuestos.



Figura 3.70 Bombas Volcánicas piroclásticas.

3.1.12 Volcán San Luis Mextepec (CVIm)

Siendo una estructura de proporciones menores tomando en cuenta las dimensiones del área determinada, el Volcán de San Luis Mextepec se localiza justamente en la misma posición que el poblado del mismo nombre y está limitado al SE por el río Tejalpa (figura 3.1).

El volcán San Luis Mextepec está formado de depósitos piroclásticos de caída con bloques y escoria de composición basáltico-andesíticos y algunos derrames lávicos basáltico-andesíticos con sus correspondientes autobrechas volcánicas. Se observaron en algunas partes derrames andesíticos-basálticos con matriz rosada de vidrio volcánico que poseen una orientación NW-SE, y una estructura masiva que no presenta muchas fracturas (figura 3.71).

En las partes bajas del volcán se caracteriza por componerse de rocas andesíticas de color negro de composición vítrea a la que se sobreponen flujos de brecha volcánica que se compone de clastos de andesita vítrea de color rosa subangulosos que van de tamaños de 5 cm a los 0.5 m y una matriz de cenizas volcánicas de color rosas a café claro (figura 3.72 y 3.73). Los flujos de brechas volcánicas cubren más de la mitad de la extensión al cuerpo volcánico.

En el flanco norte del volcán se aprecian secuencias de rocas andesíticas-basálticas con bloques que presentan fracturamiento de rompecabezas, estas lavas son cubiertas de cenizas finas con un espesor de 40 cm. Las cenizas volcánicas son cubiertas de suelos de reciente formación que aumentan de espesor hacia las partes bajas en las laderas (figura 3.74). En la figura 3.75 se observan unidades de flujos lávicos intercalados con capas de depósitos piroclásticos que son similares a los presentes en el volcán El Molcayete, interpretando que es una capa en común entre las dos estructuras.

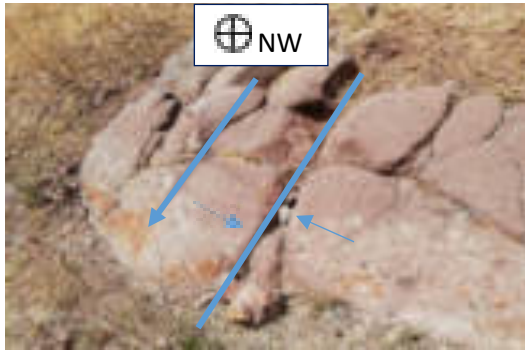


Figura 3.71 Flujo andesítico n.1 con fracturamiento dirección SE-NW.



Figura 3.72 Flujo andesítico n.2 con presencia a los lados de brecha volcánica.



Figura 3.73 Arriba brecha volcánica, Abajo flujo andesítico n.2.



Figura 3.74 Secuencia de estratos, Abajo flujo andesítico, al medio cenizas y arriba suelos.



Figura 3.75 Bandeamientos de flujos.

3.1.13 Volcán El Perico (CVp)

El volcán El Perico adquiere el nombre del Cerro El Perico. Está ubicado al Norte del poblado más próximo, San Pablo Autopan y se define al Suroeste por el río Tejalpa (figura 3.1). Los depósitos volcánicos que se observan desde la parte baja a la parte alta de su cono son: derrames lávicos andesíticos-basálticos, depósitos piroclásticos con cenizas volcánicas, lapilli volcánicos con pómez, y depósitos piroclásticos de caída de bloques con bombas volcánicas en las partes altas de la estructura. Es una de las estructuras volcánicas con más subunidades volcánicas, tiene una altitud de 2640 msnm.

En la base de la estructura volcánica se tienen los derrames de lava basáltica-andesítica. En estos derrames se han desarrollado varias minas de recursos pétreos que extraen esta roca para fines de la construcción y en algunos lugares fabrican molcajetes. Los derrames lávicos son cubiertos por brechas volcánicas, cenizas, pómez y suelos. Se observaron en partes altas de la estructura bombas volcánicas en una mina ubicada en las partes altas (figura 3.76).

Los derrames lávicos andesítico-basálticos presentan fracturas con dirección N-S, otros conjuntos de fracturas con dirección NW-SE que a su vez también son cortadas por un conjunto de fracturas más SW-NE (figura 3.77). Algunas de estas fracturas se presentan rellenas por limos-arenosos. El volcán El Perico se considera de edad Cuaternaria esto por correlación con volcanes piroclásticos y cineríticos de la región de la cuenca de Toluca.



Figura 3.76 Estratos sobre puestos del Volcán El Perico.



Figura 3.77 Conjunto de fracturas.

3.1.14 Volcán El Molcajete (CVm)

El Volcán El Molcajete toma el nombre del Cerro El Molcajete, el cual está ubicado al Norte del poblado de San Luis Mextepec y al Sur de la cabecera municipal del municipio de Almoloya de Juárez, en este trabajo se describe como un Volcán de tipo cinerítico y piroclástico de acuerdo a sus características geológicas, el volcán comprende también La Loma El Conejo que presenta las mismas características litológicas.

El volcán Molcajete presenta derrames lávicos andesítico-basálticos, depósitos piroclásticos de bloques andesíticos y basálticos y depósitos de escorias volcánicas con bombas volcánicas basálticas. El volcán tuvo por lo menos 3 fases eruptivas distinguibles gracias al cambio de litología en los tipos de productos volcánicos, siendo una de las estructuras más grandes del área de estudio como se identifica en la figura 3.1.

El volcán se compone principalmente de andesita y basalto con una textura porfídica y afanítica, dichos flujos de andesitas y basaltos son de color gris claro a gris oscuro que se ven cubiertos en las partes altas del volcán así como en la parte central que forma el cráter se encuentra cubierta de depósitos piroclásticos andesíticos-basálticos con clastos de composición que van de andesitas a basalto. En las partes de escoria volcánica hay muchos fragmentos oxidados a óxidos de hierro e

hidróxidos de hierro de color rojo oscuro; en algunas partes se observó intercalaciones de escoria volcánica color negro con abundantes texturas vesiculadas, que a la vez se encuentran cementados por material de la misma composición (figura 3.78).

En las partes bajas y alrededores del cono volcánico se observan algunos derrames lávicos de andesita-basalto y depósitos piroclásticos de cenizas volcánicas de color pardo oscuro a claro y tonalidades amarillentas (figuras 3.79 y 3.80) también se observaron suelos derivados de cenizas volcánicas andesítico-basálticas.



Figura 3.78 Brecha volcánica presente en las partes altas del Volcán El Molcajete.



Figura 3.79 Bandeamientos de materiales de flujo piroclástico, en las partes más bajas del volcán.



Figura 3.80 Bandeamientos de materiales de flujo piroclástico, en las partes más bajas del volcán (Ampliación).

En la parte interna del volcán El Molcajete se observó una falla de tipo normal NW-SE que afecta a los depósitos piroclásticos de bloques andesíticos. Esta falla se denomina en este trabajo Falla Santiaguito y es descrita más adelante. Otras fallas y fracturas aparecen en la parte Norte del volcán.

3.1.15 Depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuauhtenco y oleadas piroclásticas San Lorenzo (CDIc-FL)

Los depósitos fluvio-lacustres de San Lorenzo Cuauhtenco afloran en la parte noroeste del área de estudio. Son cortados por la autopista de valle de Bravo y tiene afloramientos representativos en las cercanías de la caseta la Hortaliza. Los afloramientos están limitados en dirección oriente por el río La Alcantarilla y en su parte poniente por el río San Pedro (figura 3.1).

Los depósitos fluvio-lacustres están formados por lentes de gravas y arenas gruesas fluviales que se interdigitan con sedimentos de limos y arenas más finas, y capas de arcillas limosas. En uno de los cortes de la carretera de a Valle de Bravo aprecian los depósitos fluvio-lacustres con una altura aproximada de 15 m en donde se distinguen 4 capas principales, la capa inferior se compone de limos arcillosos con presencia de raíces, ya que presentan arenas laminadas, con lentes de gravas de tamaños de 2 a los 10 cm de composición andesítica con espesores que van de los 2 a 6 metros de longitud, dispersos sobre toda la capa. Las gravas y arenas presentan laminaciones cruzadas y clastos imbricados. Estas capas de sedimentos se interpretan como antiguas llanuras de inundación.

En la columna litológica del corte carretero los anteriores depósitos son sobreyacidos por una capa de arena limosa diferenciada por ser un estrato ininterrumpido con espesor de 0.5 m, al cual le sobreyacen capas de arenas muy pobremente clasificadas con lentes de gravas con formas esferoidales, la capa expuesta hacia la superficie se compone de suelos de formación reciente (figura 3.81).

Los depósitos sedimentarios de la unidad son cortados por algunas fracturas con actitud estructural $350^{\circ}/88^{\circ}\text{NE}$ la cual se encuentra rellena de arcilla de color negro

que hace evidente la presencia de materia orgánica, cortando a las unidades anteriormente descritas (figura 3.81).

La presencia una falla del tipo normal que se hace evidente por un graven pequeño con desplazamiento de 1.5 metros con una actitud estructural de $305^{\circ}/87^{\circ}\text{NE}$, conforme se avanza en dirección Este.

En afloramientos a lo largo de la autopista se observó a los depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuauhtenco cubiertos por unidades más jóvenes como secuencias de paleosuelos intercalados con depósitos de limos-arcillosos de probable origen lacustre.

En otros afloramientos que son cercanos al río La Alcantarilla se identificaron cubriendo a estos depósitos fluviales algunos depósitos piroclásticos como depósitos de caída con lapilli basálticos y en otros lugares se identificaron lahares volcánicos de composición andesítica. En las partes bajas de la columna se encuentran estratos de arenas, limos y arcillas (laminadas), y depósitos de gravas de la misma composición con estratificación cruzada (figura 3.82).

Secuencia de oleadas piroclásticas San Lorenzo

Una secuencia de oleadas piroclásticas aflora al Oeste y hacia el Sur de los depósitos fluvio-lacustres de San Lorenzo Cuauhtenco. Los afloramientos se pueden observar a lo largo de la carretera federal Toluca-Valle de Bravo se observan diferentes estratos que se extienden por kilómetros y se identifican de diferentes formas debido al comportamiento de la topografía del sitio. En las partes alta de las columnas litológicas de las oleadas piroclásticas se identificaron suelos y depósitos fluviales compuestos de estratos de gravas y arcillas interestratificadas depositadas sobre flujos piroclásticos de cenizas con pómez (figura 3.83).

A lo largo de la carretera en dirección Sur hacia Toluca aparece la secuencia de oleadas piroclásticas que se presentan como capas de flujos piroclásticos de pómez y cenizas intercaladas con oleadas piroclásticas. Unas capas se caracterizan por ser de tamaño de granulometría como gravas y arenas. En otras capas de los flujos

piroclásticos de cenizas y pómez se observaron vestigios de materia orgánica calcinada.

La secuencia de flujos piroclásticos con pómez y ceniza, con capas de oleadas piroclásticas se interpreta puedan haber sido originadas por el volcán San Antonio. Ya que este volcán presenta varias unidades de flujos piroclásticos hacia su periferia como en San Antonio Acahualco, San Francisco Tlalcilalcalpan y Santa María.

En algunos afloramientos los flujos piroclásticos y oleadas son sobreyacidos por depósitos de gravas de rocas andesíticas moderadamente clasificadas las cuales se separan de estratos con gravas y arenas, posterior a ellos se aprecian gravas de mayor tamaño alcanzando tamaños de 1 a 15 cm con una matriz de arenas medianamente clasificadas, y finalmente cubiertas por una capa de suelos nuevos (figura 3.84 y 3.85). En otros afloramientos se observan intercaladas con capas de oleadas piroclásticas con depósitos de ceniza de caída.

Hacia la parte Sureste del depósito se aprecian cortes de 12 metros de espesor con diferentes estratos identificados, la capa superior representada por suelos de reciente formación sobrepuestos a unidades de cenizas, las cuales se depositaron sobre flujos piroclásticos, la parte inferior está constituida por arenas y gravas las cuales se dividen por el medio por una franja obscura la cual indica abrasión por flujo piroclástico el cual arrastro secuencias sedimentarias (figura 3.86).



Figura 3.81 Secuencia de unidades estratificadas cortadas por fractura.



Figura 3.82 Unidades de depósitos lacustres.



Figura 3.83 Depósitos fluviales provenientes de las unidades de Acahualco y San Lorenzo Cuauhtenco.



Figura 3.84 Secuencia de unidades estratificadas.



Figura 3.85 Secuencia de unidades estratificadas de oleadas piroclásticas y depósitos fluviales.



Figura 3.86 Secuencia de oleadas piroclásticas en unidades estratificadas de espesores superiores a los 15 m desde la superficie hasta la base de los ríos cercanos.

3.1.16 Depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca (CDsvVT-FLP)

- Fluvio-lacustres y piroclásticos

Esta unidad está distribuida en la mayor parte de las partes planas de Toluca y se compone de capas de depósitos fluvio-lacustres, fluviales, paleosuelos y depósitos piroclásticos. Dichos depósitos se caracterizan primordialmente por el transporte de material arrastrado por los ríos del área por lo cual se encuentran distribuidos principalmente en el centro de la zona y en partes intermedias entre estructuras volcánicas (figura 3.1).

Las capas de depósitos fluviales, fluvio-lacustres y depósitos piroclásticos de esta unidad afloran a lo largo y dentro de los valles fluviales de los ríos principales como lo son: Río Tejalpa, El Río El Chiquito, Río Verdiguél y El Río San Pedro (figura 4.1).

En afloramientos a lo largo del valle del río Tejalpa se observaron alturas de afloramientos de 15 m, estos afloramientos en el río Tejalpa muestran hacia la base flujos de lahares con clastos de roca andesítica. Estos lahares son sobreyacidos por secuencias de cenizas volcánicas y paleosuelos intercalados y la capa última son depósitos fluviales (figuras 3.87, 3.88 y 3.89).

Los depósitos de gravas y arenas fluviales se extienden en la parte norte del río Tejalpa desde Calixtlahuaca hasta las cercanías de San Martín y la población de Santiaguito Tlalcálcalli. Se tiene como base conglomerados que integran clastos bien redondeados de características litológicas de andesita, a este estrato se depositan arenas finas con una proporción de 1 m, secuencialmente se integran depósitos de arenas gruesas que se encuentran cubiertas por suelos de reciente formación (figura 3.87).

Posteriormente la unidad conserva las mismas características a excepción de las capas más superficiales que se integran gravas bajo la capa de suelos (figura 3.88). Posteriormente las unidades cambian debido por el arrastre de sedimentos de los cuerpos volcánicos más cercanos, en la parte inferior se ubican lahares intercalados con los flujos piroclásticos como se observa en la figura 3.88.

En la figura 3.89 la última secuencia observada se presentan lahares a los que se sobreponen paleosuelos, continuados de un estrato de gravas y arenas estratificadas de forma lenticular, a la secuencia de estratos continúan paleosuelos originados posteriormente que se ven recubiertos por flujos piroclásticos de composición andesítica y finalmente en su superficie se encuentran suelos de reciente formación.



Figura 3.87 Secuencia de unidades estratificadas.



Figura 3.88 Secuencia de unidades estratificadas sobre flujos volcanicos provenientes de la unidad el Tencho.

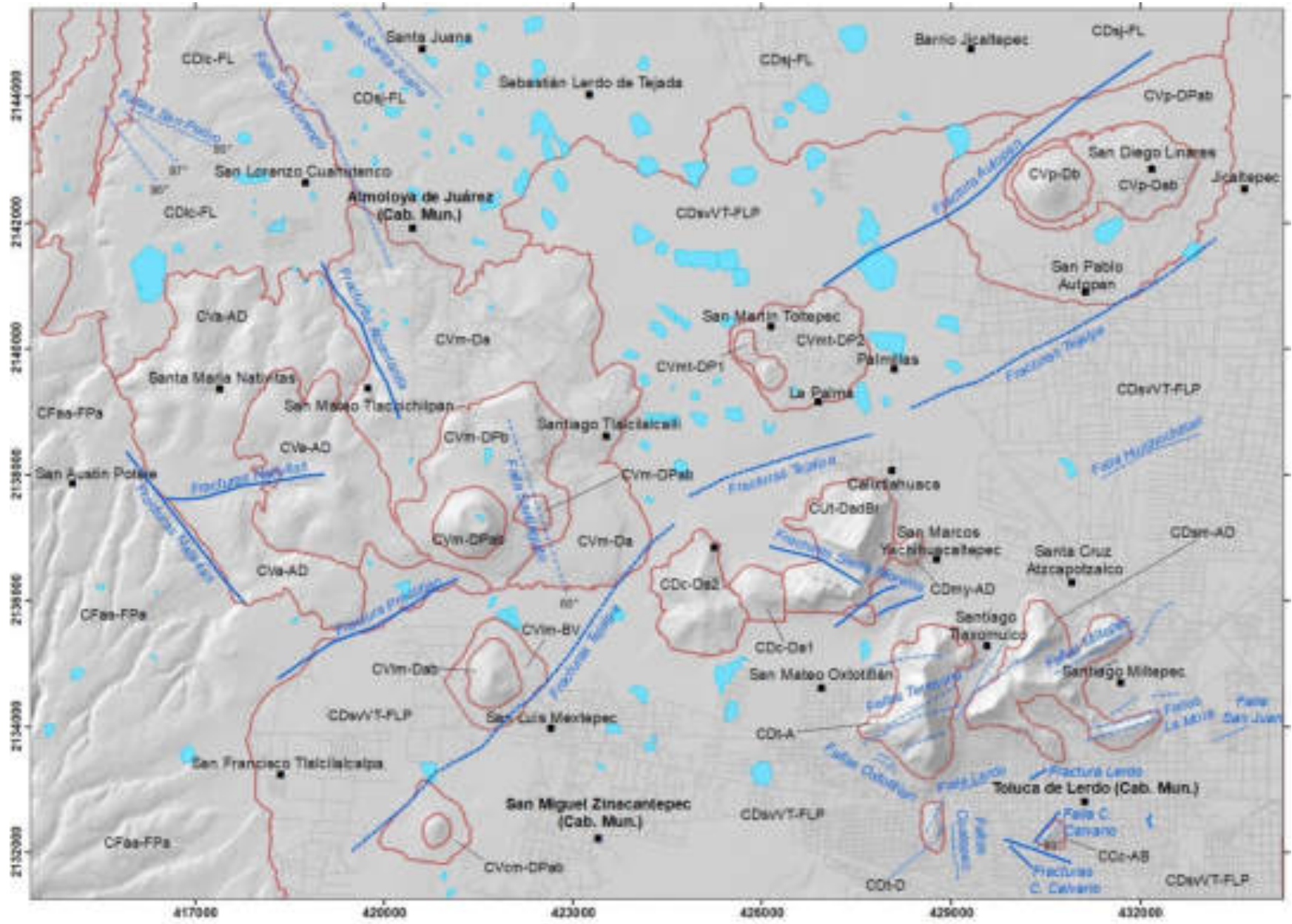


Figura 3.89 Secuencia de unidades estratificadas.

3.2 Geología estructural

El área de estudio presenta varios conjuntos de fallas y fracturas. En este trabajo se identificaron nuevas fracturas y fallas mientras que otras se retoman del trabajo de Almazán-Vázquez (2017). Almazán-Vázquez (2017), identificó fracturas y fallas en el centro de Toluca a través de fotointerpretación, trabajo de campo y análisis de datos en gabinete. En este trabajo también se realizó fotointerpretación para determinar lineamientos estructurales, también se realizó el reconocimiento de campo para corroborar los datos registrados en algunas de las fallas y fracturas.

Las principales fallas y fracturas que se tienen en el área de este trabajo y algunas nuevas identificadas son: fallas de Miltepec y La Mora, fallas y fracturas del Cerro del Calvario, Fallas y fracturas del Cerro de Coatepec, fallas Oxtotitlán, fallas La Teresona, fracturas Sierra Morelos, falla y fractura Lerdo, fracturas Tejalpa, falla Santiaguito, fractura Autopan, fractura Alcantarilla, fracturas Nativitas y fractura Guadarrama, falla Santa Juana, falla San Lorenzo y fallas San Pedro. Estas fallas se muestran en la figura 3.90. En el mapa de estructuras de la figura 3.90 se pueden ver que las fracturas y fallas tienen orientaciones NE-SW y NW-SE.



Simbología

Elementos Estructurales

- ✦ Domo
- Estructura volcánica
- Falta normal
- ⋯ Falta normal inferida
- Fractura
- ⋯ Fractura inferida

Elementos Topográficos

- Localidades
- Calles
- ☿ Cuerpos de agua
- ▭ Contacto litológico



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IPOMEGEM, INEGI, CONABIO, SGM, Almazán-Vázquez, 2017.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Angeles Moreno

Figura 3.90 Mapa geológico estructural del área de estudio.

3.2.1 Fallas

Fallas La Teresona

Las fallas y fracturas de La Teresona se ubican a lo largo del Cerro de La Teresona y una orientación de N55°E, S66°E, S52°E y S86°E (Almazán-Vázquez, 2017). Las fallas presentan longitudes de cerca los 4 kilómetros de longitud, con desplazamientos verticales de 2.5 m (figura 3.90) denotados por los desplazamientos de construcciones. Algunas fracturas y fallas presentan escarpes de falla que presentan pendientes de 70° a 90°. En algunos casos se han identificado en los alrededores del Cerro La Teresona deslizamientos de terreno y en específico sobre los flancos suroeste y norte.

Fallas La Mora

Las fracturas y fallas La Mora fueron definidas por Almazán-Vázquez (2017) como las fallas y fracturas que afectan casas habitación en el fraccionamiento La Mora. Estas estructuras son cuatro fallas que tienen direcciones que varían de E-W a NE-SW. Algunos valores específicos fueron documentados en el fraccionamiento de Rancho La Mora con valores en rumbo de N85°E, N80°E, N89°E y N65°E (Almazán-Vázquez, 2017). Estas fallas presentan longitudes de su traza de falla que varían de 500 m a 1.2 km aproximadamente. Dichas fallas se ven representada en la figura 3.91.

Fallas Miltepec

Las fallas de Santiago Miltepec fueron definidas en el trabajo de Almazán-Vázquez (2017) y en este trabajo se comprobaron. Las fallas identificadas en la comunidad de Santiago Miltepec (figura 3.90) presentan orientaciones N80°E, N70°E y N45°E. Algunas fallas parecen seccionarse o ser totalmente distintas de las cuales su longitud es de 0.5 km aproximadamente mismas que delimitan al cerro El Barrigón, mientras que las fallas de mayor extensión identificada en su traza de falla llegan a medir 1.5 km la cual se caracteriza por formar Escarpes sobre el flanco SE atravesando por completo la estructura volcánica.



Figura 3.91 Fotografía e esquema de representación de las Fallas La Mora (Av. Isidro Fabela dirección Torre Bicentenario).

Falla Lerdo

En la figura 3.90 se muestra también a la falla de Lerdo que fue identificada por Almazán-Vázquez (2017). Esta falla se presenta como fracturas a lo largo de la vialidad de Lerdo en la ciudad de Toluca y su traza parece extenderse por 0.4 km con orientación N70°E. Esta falla sigue como fracturas en dirección Este.

Fallas Oxtotitlán

Las fallas Oxtotitlán están presentes en el poblado de San Mateo Oxtotitlán y fueron identificadas por trabajos de protección civil de Toluca y reafirmadas en el trabajo de Almazán-Vázquez (2017). En las calles de esta población aparecen como escalones y grietas relacionadas; afectan a viviendas que se edificaron sobre el trazo de estas fallas. Se diferencian dos fallas con direcciones NW-SE y con orientación específica de N50°W y echados 60° a 80° hacia el SW. La longitud de las fallas que atraviesan esta parte del área llega a tener 500 m siendo notorias en la superficie del terreno, mismas que muestran desplazamiento, así como cambios repentinos en el nivel del suelo de hasta 20 cm verticales de diferencia entre niveles como se muestra en la figura 3.92.

Falla Cerro del Calvario

Las fracturas y fallas de Cerro del Calvario fueron definidas en el trabajo de Almazán-Vázquez (2017) y en este trabajo se corroboraron. Las fracturas y fallas se presentan algunas en los alrededores y otras afectan las rocas que componen al cerro. Una falla dentro del Cerro del Calvario está caracterizada por una longitud de

700 m (figura 3.90) y presenta fracturas relacionadas de orientaciones $N45^{\circ}E$ y $N60^{\circ}W$ y $N35^{\circ}W$, de las cuales se interpreta a la falla con dirección NE como limitante de la litología de la estructura volcánica. Las fracturas y fallas afectan a las rocas andesítico-basálticas de la unidad Cerro del Calvario. La presencia de fracturas y fallas en la zona puede representar inestabilidad en la infraestructura sobre el cerro ocasionando posibles derrumbes, posibles deslizamientos y agrietamientos como se muestra en la figura 3.93.

Fallas Coatepec

Estas fracturas y fallas se presentan en el Cerro de Coatepec afectando a las unidades de derrames lávicos y flujos de brechas volcánicas andesítico-dacíticas que forman el Cerro de Coatepec (figura 3.90). Se identificaron conjuntos de fallas, el primero se orienta NE-SW con rumbo específico de $N27^{\circ}E$. Otras fallas presentan direcciones E-W en la parte sur del Cerro. Las fallas llegan a tener longitudes que van de los 200 m a los 700 m en su traza de falla. Unas fracturas su dirección va $N87^{\circ}W$, con una extensión aproximada de 1.1 km. Las fallas se evidencian por la figura 3.94.

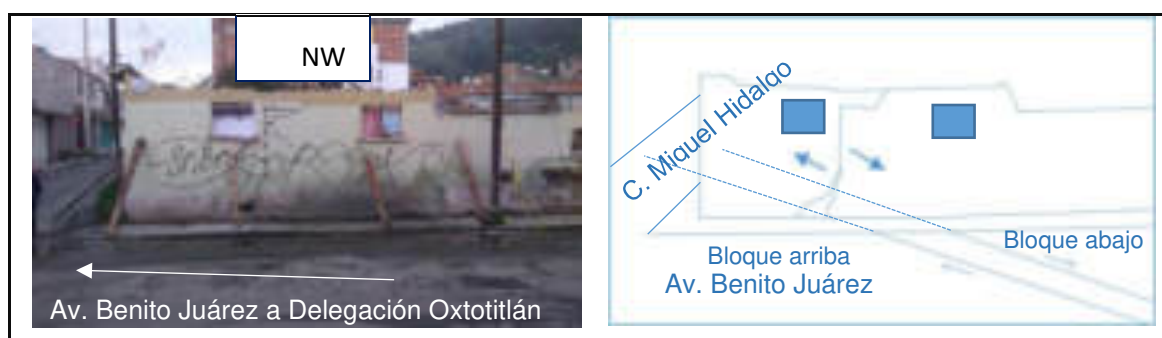


Figura 3.92 Fotografía e esquema de representación de Fallas Oxtotitlán (Av. Benito Juárez dirección delegación San Mateo Oxtotitlán).

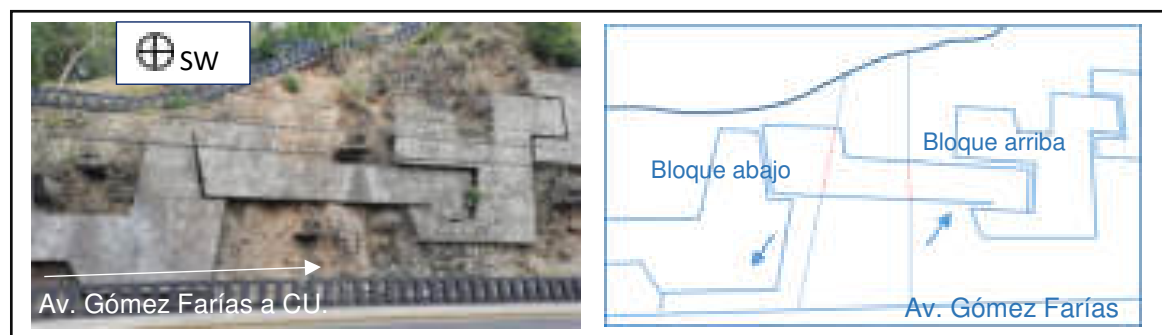


Figura 3.93 Fotografía e esquema de representación de la Falla Cerro del Calvario dirección CU.



Figura 3.94 Fotografía e esquema de representación de la Falla Coatepec (Av. Paseo Universidad dirección Av. Vicente Guerrero).

Falla San Lorenzo

La falla San Lorenzo es un lineamiento estructural que puede ser una falla que se infiere en este trabajo. Esta falla está ubicada en la parte noroeste del área de estudio. La falla San Lorenzo (lineamiento estructural) tiene una dirección NW-SE. La posible existencia de esta falla es soportada porque separa las unidades de depósitos fluvio-lacustres Santa Juana de los depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuautenco (figura 3.90) y tiene una expresión morfológica a través del río Almoloya. La traza de esta falla tiene una distancia aproximada de 6km a través del río Almoloya.

Falla Huichochitlán

La falla adquiere el nombre del poblado de San Cristóbal Huichochitlán, mide aproximadamente 1.7 km con una orientación $N60^{\circ}E$. Esta falla es inferida con base en la fotointerpretación y con base en registros de campo. Presenta una orientación similar a la fractura Autopan y a la fractura Tejalpa con orientaciones NE-SW. Se interpreta que puede ser del mismo conjunto de fallas y fracturas NE-SW que la fractura Autopan y la fractura Tejalpa, estas ambas ubicadas al Norte del área de estudio (figura 3.90).

Fallas San Pedro

Es un conjunto de varias fallas y fracturas observadas en campo a lo largo de la autopista de Valle Bravo y en las cercanías de la caseta La Hortaliza. Estas fracturas y fallas afectan a la unidad sedimentaria de depósitos fluvio-lacustres de San

Lorenzo Cuauhtenco. Las fallas son fallas de tipo normal y algunas no presentan evidencias de desplazamiento vertical. De estas fallas, se desconoce su longitud en su traza ya que se observan sobre un corte carretero. Algunas orientaciones de estas fallas son: rumbo N38°W y echado S86°W; rumbo N45°W y echado N87°W; rumbo N65°W y echado S80°W. Dos de las fallas generan un pequeño graven con separación de 1.5 m.

Falla Santa Juana

Nombrada de esta forma por tener como poblado más cercano el de Santa Juana se orienta NW-SE. Esta falla corta a la unidad de depósitos fluvio-lacustres Santa Juana y presenta una orientación similar a la falla San Lorenzo.

Falla Santiaguito

La falla Santiaguito está ubicada en una de las laderas del volcán El Molcajete en las cercanías de la cabecera municipal de Almoloya de Juárez. Es una falla de tipo normal que afecta a depósitos piroclásticos del volcán. La falla presenta una actitud estructural de N30°W a 60°NE. La falla se infiere continua en su traza por debajo de depósitos volcánicos del volcán Molcajete y se oculta tanto en dirección noroeste y dirección sureste (figura 3.90).

3.2.2 Fracturas

Fractura Alcantarilla

Esta fractura se ubica en las cercanías del poblado de San Mateo Tlalchichilpan al norte del cerro El Molcajete. Esta fractura se infiere que existe ya que controla el patrón fluvial del arroyo La Alcantarilla y pone en contacto productos volcánicos de los volcanes volcán El Molcajete a la derecha y los derrames del Volcán El Aire hacia la izquierda (figura 3.90), coincide sobre el cauce del arroyo la Alcantarilla con una longitud de 2.7 km que tiene a orientarse N30°W.

Fracturas Nativitas

Las fracturas Nativitas son dos fracturas, la fractura Guadarrama y la fractura Nativitas. La fractura Guadarrama controla el cauce del arroyo Guadarrama; esta

fractura se orienta N45°W con una extensión de su traza de 3 km. La fractura Nativitas tiene una orientación NE-SW con una longitud de su traza de cerca 2.5 km y una dirección N75°E.

Fractura Prostitlán

La fractura Prostitlán se ubica a lo largo de una parte del río San Pedro en las cercanías de San Francisco Tlalcilcalpan. La fractura tiene una longitud de cerca 3.2 km de longitud aproximadamente con orientación N48°E delimita características litológicas entre los flujos piroclásticos San Antonio Acahualco y los depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca. La fractura se infiere está oculta debajo de depósitos sedimentarios y volcánicos del valle de Toluca pero que tiene expresión morfológica en las unidades más jóvenes.

Fracturas Sierra Morelos

Nombradas de esta manera por encontrarse en el parque Sierra Morelos en la colonia San Mateo Oxtotitlán (figura 3.90). Estas fracturas y fallas dividen a depósitos volcánicos del cerro El Tencho y el cerro El Medio las fracturas y fallas tienen direcciones NW-SE y NE-SW. Algunas fracturas alcanzan una longitud de su traza de 1.5 km. Existen fracturas con forma curvilínea con una dirección N60°W. Otras fracturas presentan longitudes de cerca 1.2 km y 850 m, y orientación de N55°E, siendo la que separa al Cerro El Tencho del Cerro San Marcos.

Fractura Autopan

La fractura Autopan es una fractura inferida que se ubica en la parte norte y noreste del área de estudio y en las cercanías San Pablo Autopan. La fractura tiene una dirección NE-SW (figura 3.1, mapa geológico) y alcanza una longitud de cerca 7 km. Esta fractura limita a las rocas de las unidades geológicas del volcán San Martín y el volcán El Perico a lo largo de sus respectivos flancos de los volcanes. Esta fractura se infiere pueda estar oculta debajo de depósitos fluvio-lacustres que se expresa como un lineamiento estructural en depósitos recientes.

Fracturas Lerdo

Las fractura y falla Lerdo se ubica en la ciudad de Toluca en la parte poniente del centro de la ciudad. Esta falla fue definida por Almazán-Vázquez (2017). La fractura se localiza atravesando la vialidad de Lerdo con rumbo N70°E y con una longitud que alcanza los 380 m a lo largo de su traza con separaciones verticales que van de los 0.3 cm a los 15 cm (Almazán-Vázquez, 2017).

Fracturas El Calvario

Las fallas y fracturas El Calvario se ubica en el Parque El Calvario en el centro de la ciudad de Toluca. Las rocas de la unidad Cerro El Calvario son afectadas por estas fracturas. En la estructura volcánica se presentan fracturas que se asocian a las fallas y afectan a las construcciones. Las fracturas se expresan en la topografía generando escarpes. Las fracturas están orientadas de misma forma que las fallas, entre las más representativas las de mayor longitud atraviesan por completo el cerro por 900 m presentando separaciones de 5 cm a los 50 cm que se encuentran rellenas de materiales sedimentarios. Las fracturas tienen orientaciones NE-SW, E-W y algunas N-S.

Otro grupo de fracturas se orienta dirección NW-SE alcanzando longitudes de 420 m a 800 m aproximadamente, se ubican al Sur de la estructura volcánica (figura 3.90).

Fracturas Tejalpa

Las fracturas Tejalpa se ubican en la parte central del área de estudio y a lo largo del río Tejalpa que va de San Francisco Tlalcilcalpan a Calixtlahuaca. Estas fracturas están ocultas y cubiertas por depósitos fluvio-lacustres del valle de Toluca. La orientación de las fracturas es NE-SW y longitud de estas fracturas alcanzan cerca de 3 km y de 5.2 km. Los rumbos específicos de las fracturas que van de N45°E a N65°E y su longitud va de 3 km definiendo a la fractura más pequeña ubicada al NW de Calixtlahuaca, la segunda fractura mide un aproximado de 5.2 km y se ubica atravesando a San Pablo Autopan, por último la fractura mayor mide 6.8 km a 7 km ubicada entre el Cerro del Murciélago y San Luis Mextepec (figura 3.90).

3.3 Secciones geológicas

De acuerdo con Gregorio (2017) en una publicación para Mine Engineering Superintendent at CVG Ferrominera Orinoco C.A. las secciones geológicas son la representación en un plano vertical de una estructura geológica. Para la construcción de una sección se consideraron tareas realizadas como la representación del perfil topográfico del trazo de la sección sobre el área de estudio, la recolección de datos geológicos que previamente se muestran en la figura 3. 68 y datos geológicos del mapa geológico de la figura 3.1. También se han de considerar datos de utilidad y de vital representación como lo fueron fallas, fracturas, contactos, espesores considerados y datos de columnas litológicas de pozos de extracción.

Por demás para la realización de secciones se implementan métodos geofísicos pero en el presente trabajo solo se trabaja con datos ya existentes y datos recolectados de campo. En cada sección de las que se realizaron se diferencian los tipos de estructuras volcánicas, así como espesores estimados de cada unidad.

Las secciones resultantes (figura 3.2 y 3.3) se elaboró con datos recolectados en campo los cuales se relacionaron con datos existentes de la Carta geológico-minera de la Ciudad de México con clave E14-2 del Servicio Geológico Mexicano (2002), Carta Geológica del Estado de México de IFOMEGEM (2012) Y Expósito (2012).

Sección Geológica A´ - A´´ (figura 3.2)

La sección definida A´-A´´ tiene como coordenadas en A´: Lat-2140638.19, Lon-415059.89 y en A´´: Lat- 2133613.13, Lon-432641.93. Estas coordenadas son las terminaciones de la sección y que se muestran en el mapa geológico de la figura 3.1.

La sección representa el comportamiento bajo la superficie del terreno al evidenciar las relaciones geológicas a profundidad. Los datos de la sección se complementan con los datos estratigráficos que se presentan en la tabla 3.1. Se identifica la unidad de Flujos Piroclástico San Antonio Acahualco como la más antigua debido a su procedencia producto del volcán San Antonio que se interpretó una edad de cerca

3 Ma (García-Palomo et al., 2000) mostrándose solo en superficie en el inicio de la sección por un aproximado de 400m y un espesor que va de los 2400 msnm a 2650 msnm aproximadamente y que daría 250 m. colocándose bajo las demás unidades hasta verse interrumpida cercano a los 21 km representados en la sección geológica.

Los Domos San Marcos Yachihuacaltepec corresponden a la segunda unidad considerada más antigua debido a la interpretación geomorfológica de los cuerpos y los resultados de la sección geológica y mapa geológico. La unidad que se observa que sigue posición estratigráfica son rocas de los Domos Santiago Miltepec. Estas rocas son afectadas por el paso de las fallas Teresona, además se ve cortada por el medio de acuerdo a la sección por el conjunto de fallas La Mora, el buzamiento de los flujos se ve representado N83°E ya que es la tendencia que la mayoría de los flujos obedecen.

En sucesión el Domo la Teresona y observando la sección geológica se observa que este domo intrusionó a rocas de los Domos San Marcos Yachihuacaltepec al Oeste y con el Complejo de domos Santiago Miltepec al Este por el corte de una de las fallas La Teresona.

Los Domos Las Canoas en sus relaciones estratigráficas se observan que cortaron a antiguos flujos piroclásticos que se encuentran por debajo de los sedimentos fluvio-lacustres del Valle de Toluca. Las relaciones geológicas entre los dos domos en Las Canoas hacen suponer que los domos se formaron contemporáneamente.

La unidad El Tencho como secuencia de flujos de brechas volcánicas y derrames lávicos andesítico-dacíticos las relaciones estratigráficas están sobreyaciendo a domo Las Canoas 1 y los domos Yachihuacaltepec.-Los depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuauhtenco se formaron sobreyaciendo a unidades de flujos piroclásticos y secuencias de oleadas piroclásticas de San Lorenzo. El volcán El Aire se formó cortando a rocas de la unidad de Flujos Piroclástico San Antonio Acahualco.

El volcán El Molcajete el cual presenta tres fases eruptivas cada una de ellas definidas por sus características litológicas, debió haber intrusionado a flujos piroclásticos derivados del volcán San Antonio y del nevado de Toluca. En similar relación están otros conos cineríticos como el volcán El Aire, Cerro del Murciélago y San Luis. Como ultima unidad de más reciente formación se considera a los depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca los cuales se formaron principalmente cubriendo relaciones volcánicas de los domos volcánicos y algunos productos volcánicos de los conos cineríticos.

Sección Geológica B' - B'' (figura 3.3)

La sección definida B'-B'' tiene como coordenadas en B': Lat- 2131965.35, Lon- 420270.19 y en B'': Lat- 2144908.86, Lon- 432597.28. Estas coordenadas son las terminaciones de la sección y que se muestran en el mapa geológico de la figura 3.1.

Como unidad más antigua de las definidas en este trabajo y que se muestra en la sección geológica B'-B'' se consideró a los Flujos Piroclástico San Antonio Acahualco. Posterior a ellos se tomó en cuenta la presencia de los depósitos fluvio-lacustres Santa Juana que tienen origen en la parte Norte del Acuífero originados a partir de la actividad volcánica, ante esto se considera que los depósitos se encuentran estratificados sobre los Flujos Piroclástico San Antonio Acahualco, depósitos piroclásticos asociados a los domos volcánicos La Teresona, domos las Canoas, domos Miltepec y otros depósitos piroclásticos como lahares; para dicha interpretación sirvieron de apoyo las columnas estratigráficas de los pozos PI-162 recopilados en el trabajo de Expósito (2012).

Como se evidencia en la sección geológica, los domos las Canoas cortan a los Flujos Piroclástico San Antonio Acahualco. El volcán Cerro del Murciélago representado en la sección geológica por productos de rocas de dos etapas eruptivas mismas que dan comienzo a la sección en su porción B' y que rocas atraviesan a los Flujos piroclástico San Antonio A.

En la porción central a unos 10 km del inicio de la sección se distingue el volcán San Martín Toltepec evidenciando solo productos líticos una de sus dos fases, posicionado justo en la parte en donde se unen los flujos piroclástico San Antonio Acahualco con la unidad Fluvio-lacustre Santa Juana. La unidad volcánica más reciente es el volcán El Perico compuesto de productos volcánicos de tres fases eruptivas ordenadas una sobre la otra extendiéndose por un aproximado de 5.5 km hasta el poco antes del final de la sección.

Como última unidad se presentan los depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca que tienen extensiones mayores con presencia en todas las orillas de los volcanes.

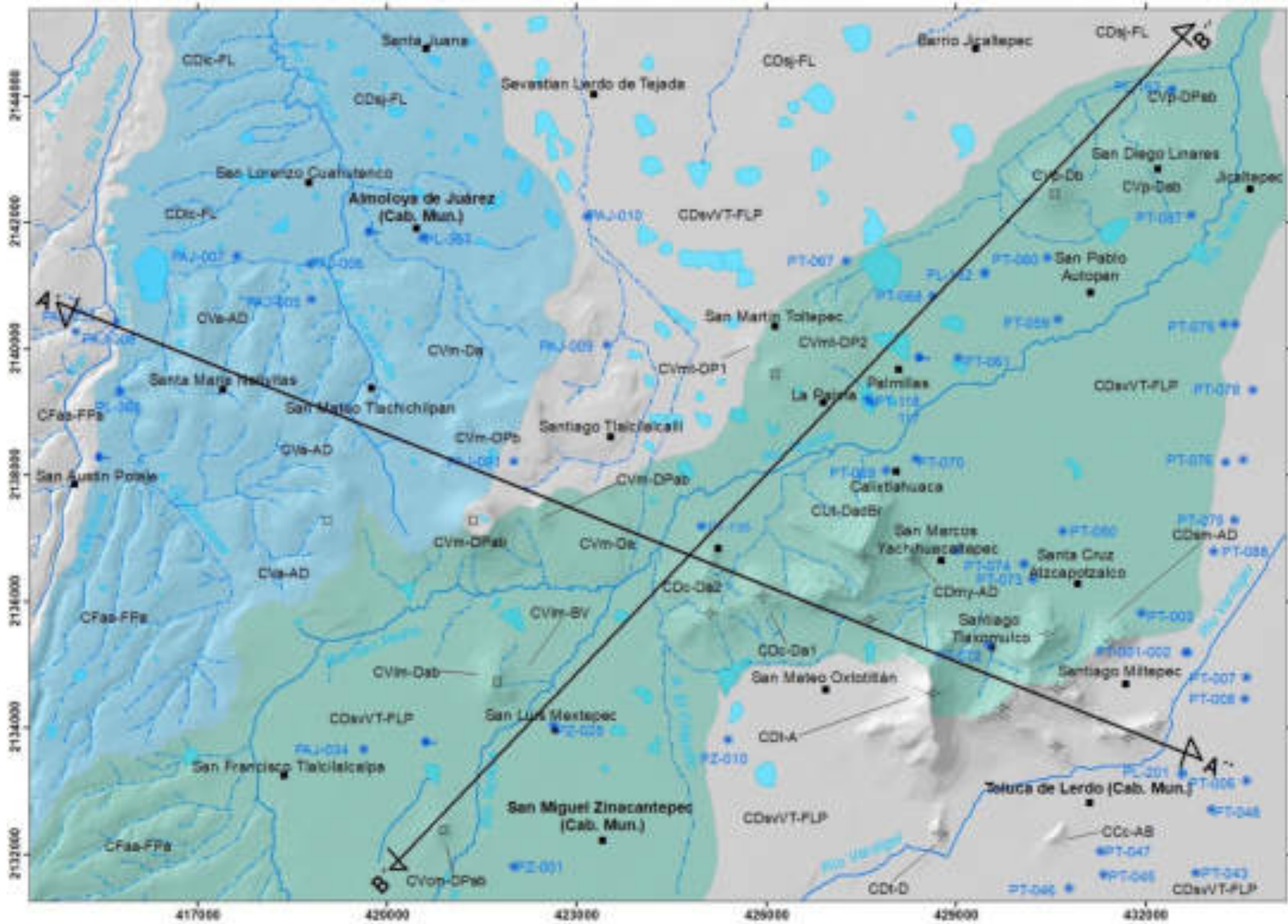
Capítulo 4. Características hidrológicas de los alrededores de los volcanes de la zona centro de Toluca

En este capítulo se presentan las características hidrológicas del área de estudio en relación con las estructuras volcánicas definidas en este estudio. En este capítulo también se muestran relaciones de los aspectos geológicos en relación con las propiedades del acuífero y que se toman en cuenta en la construcción de las secciones geológicas del capítulo 3.

El mapa hidrológico de la figura 4.1 muestra las principales corrientes superficiales del área de estudio. Uno de las corrientes que resalta en longitud es el trazo del río Tejalpa el cual alimenta al río Lerma. Por demás los afluentes más representativos se describen a continuación y se muestran en la figura 4.1.

En la figura 4.1 también se muestran los afluentes perenes representativos, pozos de extracción de agua y pozos de monitoreo (multipiezómetros). Algunos rasgos hidrológicos como los manantiales aportan información dentro de las características hidrogeológicas del sitio como se muestran en las secciones geológicas (figura 3.2 y 3.3). La información que se recolecto de columnas geológicas de multipiezómetros e información de cortes geológicos de ríos en el campo permitió afinar las relaciones hidrológicas y completar las secuencias litológicas.

En algunos casos los resultados muestran que patrones geométricos de corrientes superficiales se relacionan directamente a propiedades geológico-estructurales y que a su vez estas relaciones pueden estar relacionadas con peligros geológicos y riesgos geológicos como la subsidencia y deslizamientos.



Simbología

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Elementos Estructurales | Elementos Hidrológicos |
| ✦ Domo | ○ Pozos |
| ▣ Estructura volcánica | • Manantial |
| A—▶ Secciónes geológicas | — Ríos perenes |
| Elementos Topográficos | — Ríos intermitentes |
| ■ Localidades | • Cuerpos de agua |
| — Calles | ■ Subcuenca del río Tejalpa |
| | ■ Subcuenca del río Almoloya |



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO, SGM.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno

Figura 4.1 Mapa hidrológico del área de estudio.

4.1 Corrientes Superficiales

- *Río Tejalpa (Zinacantepec-Toluca)*

El río Tejalpa es una corriente superficial que está localizada a lo largo de la parte central del área de estudio. De acuerdo a Antón y Díaz (2000) es un río que tiene una cuenca de cerca 225 km² y que tiene su origen en el cerro la Calera con una elevación aproximada a los 3500 msnm, alimentándose hídricamente de los ríos San Pedro y Río La Huerta o Chiquito, extendiéndose con dirección Noreste hasta unirse con el Río Lerma (Antón & Díaz, 2000). Tiene su cauce hacia la parte Noreste del municipio de Zinacantepec y parte centro de Toluca, es una corriente superficial perenne.

A la altura de las poblaciones de Tecaxic y Calixtlahuaca se observaron flujos piroclásticos de bloques de andesita y algunos depósitos de lahares en la base del río Tejalpa. Estas unidades muestran que son impermeables desde el punto de vista hidrogeológico ya que se observan cuerpos de agua en los sedimentos de gravas y arenas que pertenecen a la unidad de depósitos sedimentarios del Valle de Toluca y que se pueden considerar un acuífero libre en esta parte.

Entre las poblaciones Tecaxic y San Pablo Autopan el río Tejalpa sigue una dirección en su curso rectilínea NE-SW, lo que sugiere la presencia de una fractura que pueda controlar su curso. Esta fractura fue descrita en el apartado de geología estructural.

- *Río San Pedro (Zinacantepec-Toluca)*

Este río adquiere el nombre de la localidad del municipio en donde principalmente se sitúa, llama San Pedro Tejalpa. El río tiene sus orígenes hacia las partes de piedemonte del volcán San Antonio y del volcán Nevado de Toluca, algunos afluentes se ubican al poniente de las poblaciones de San Antonio Acahualco y San Francisco Tlalcilcalpan (figura 4.1, mapa hidrológico). En los afluentes cercanos a la Hacienda de San Pedro Tejalpa existen algunos manantiales que se encuentran en rocas piroclásticas de flujos piroclásticos derivados del volcán San Antonio y que alimentan al río San Pedro. Su distribución espacial va desde la parte Centro-Norte

del municipio de Toluca y se extiende por una longitud su curso de 12.8 km hasta unirse al río Tejalpa comportándose como una corriente perenne. El curso de este río rodea a los volcanes de San Luis Mextepec y volcán Cerro del Murciélago lo que puede significar que rodea a derrames de lava basálticos derivados de estos volcanes y que están cubiertos por sedimentos fluvio-lacustres y aluviales de unidad de depósitos sedimentarios y volcánicos del valle de Toluca.

- *Río El Chiquito (Zinacantepec)*

El río Chiquito está localizado dentro del Municipio de Zinacantepec, y tiene una dirección en su curso N-S (figura 4.1). Se trata de una corriente superficial de carácter intermitente, el cual tiene origen en la localidad de San José Barbabosa y su curso tiene una longitud de 5.81 km aproximadamente hasta unirse al río Tejalpa hacia el Noreste del Municipio de Zinacantepec, El río Chiquito se une con el río Tejalpa y río San Pedro en las cercanías del contacto litológico de las rocas de los domos Las Canoas y los derrames lávicos del volcán El Molcajete, siendo este un paso estrecho para las aguas superficiales.

- *Río Verdiguél (Toluca)*

El río Verdiguél nace de las partes altas del Volcán Nevado de Toluca hasta que se integra al Río Lerma cruzando por el medio de la ciudad de Toluca, la longitud promedio aproximada del río en el municipio de Toluca es de 37,150 m, y de dicha longitud 28,163 m se encuentran a cielo abierto y 8,987m se encuentran en embovedados (Coordinación Municipal de Protección Civil Toluca, 2016). Este río Verdiguél sigue una dirección en su curso NE-SW y dentro de la ciudad de Toluca a lo largo de la avenida de Lerdo parece controlado estructuralmente por la falla de Lerdo.

- *Río Almoloya (Almoloya de Juárez)*

Siendo esta la corriente superficial de mayor importancia del municipio se origina por confluencia de los arroyos, arroyo Seco y arroyo La Alcantarilla, es un río de carácter perenne, con origen al Oeste de la cabecera municipal de Almoloya de Juárez. Su longitud es de 11.7 km hasta que desemboca en la Presa Ignacio

Ramírez. El río Almoloya es controlado en su curso por la falla San Lorenzo con dirección NW-SE y también el manantial Santuario Ojo de Agua de Almoloya parece controlado la falla, ya que se encuentra en la misma dirección que sigue la traza de la falla (figura 4.1).

- *Arroyo La Alcantarilla (Almoloya de Juárez)*

El origen del arroyo se da en la localidad de la Loma de San Luis Mextepec al poniente del volcán El Molcajete. Es por naturaleza una corriente superficial perenne que se extiende en su curso por 5.08 km aproximadamente hasta que se integra con el río Almoloya, se ve nutrido por pequeñas corrientes intermitentes de las cercanías provenientes del Cerro El Aire y el Volcán Molcajete. El arroyo Alcantarilla es controlado estructuralmente por la fractura Alcantarilla que sigue una dirección NW-SE.

- *Arroyo Seco (Almoloya de Juárez)*

Es el segundo río que se une al río Almoloya, es una corriente superficial intermitente cuyo curso se une a los arroyos Guadarrama y La Barranca hacia aguas arriba. Se prolonga desde la colonia San Miguel Almoloyan hasta el Barrio San Pedro con una distancia recorrida de 6.34 km. El arroyo Seco en la parte norte a Santa María Nativitas sigue un control litológico entre las rocas de las unidades depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo y rocas volcánicas de del volcán El Aire.

- *Arroyo Guadarrama (Almoloya de Juárez)*

El arroyo de se localiza en las cercanías de San Agustín Potejé. Este arroyo sigue una dirección NW-SE y es controlado por la fractura Guadarrama que es parte de las fracturas Nativitas. Siendo uno de los dos que alimentan al Arroyo Seco, es una corriente superficial del tipo intermitente ya que se ve alimentado por pequeños arroyos que se forman en las partes bajas del Volcán Nevado de Toluca durante la temporada de lluvias. Se extiende por una longitud aproximada de 3.89 km.

- *La Barranca (Almoloaya de Juárez)*

Se une con el arroyo Guadarrama para formar el arroyo Seco. El arroyo La Barranca tiene una longitud aproximada de 3.44 km con origen en la colonia Bellavista hasta que se integra al arroyo Seco en el ejido Tres Barrancas. Este arroyo, La Barranca, es arroyo alimentado por aguas que bajan del volcán San Antonio. El arroyo es limitado por depósitos piroclásticos derivados del volcán San Antonio y en sus llanuras de inundación se presenta actividad agrícola.

- *Arroyo San Pedro (Almoloaya de Juárez)*

El arroyo San Pedro está ubicado entre la localidad La Hortaliza y las cercanías con la población de Santa María Nativitas. El arroyo presenta una longitud aproximada de 5.6 km forma parte de la continuidad del arroyo Ojo de Agua, tiende a comportarse como una corriente superficial intermitente ya que depende de arroyos aguas arriba los cuales poseen las mismas características.

- *Arroyo Ojo de Agua (Almoloaya de Juárez)*

Siendo un arroyo con poca extensión es aquel que alimenta al arroyo San Pedro, su longitud se limita a 2.5 km es de carácter intermitente y se presenta también como una continuación al arroyo Xatí que se encuentra aguas arriba. Este arroyo tiene una dirección en su curso de N-S y limita a los afloramientos de depósitos fluvio-lacustres de San Lorenzo Cuauhtenco de los flujos piroclásticos de San Antonio Acahualco.

- *Arroyo Xatí (Almoloaya de Juárez)*

Sus orígenes se dan hacia la parte Centro-Sur en la colonia Olaldea del municipio de Almoloaya de Juárez extendiéndose su curso por 2.05 km hasta unirse al arroyo Ojo de Agua en la localidad de San Miguel Almoloayan. Se ve alimentado hídricamente por el arroyo Oyamel y Arroyo Hojas Anchas, comportándose como una corriente superficial perenne. El arroyo sigue una dirección de su curso N-S al igual que el arroyo Ojo de Agua. Este arroyo corta depósitos de flujos piroclásticos de San Antonio y las oleadas piroclásticas de San Lorenzo.

4.2 Tipos de acuíferos en el área de estudio

Ubicada dentro de la Región Hidrológica No.12 el área de estudio corresponde al acuífero del Valle de Toluca con la correspondiente clave 1501 el cual forma parte de la Cuenca Alta del Río Lerma, localizado dentro del Estado de México, limitándose al sur con el Altiplano Mexicano y al norte con el acuífero Atlacomulco-Ixtlahuaca, al sur por el cerro de Tenango, al Sur-Poniente del Volcán Xinantécatl (Nevado de Toluca) y al Oriente por la Sierra de las Cruces y Monte Alto. Cuenta con un área aproximada a los 2,738 km² (CNA, 2015).

Definiendo al sistema acuífero del Valle de Toluca y de acuerdo a las propiedades de porosidad y fracturamiento de las unidades litológicas, el acuífero superior corresponde a un medio poroso lo cual hace que su funcionamiento sea la de un acuífero de tipo libre, mientras que el inferior es de naturaleza fracturada se comporta como un acuífero semiconfinado (CNA, 2015).

El decreto presidencial del 10 de agosto de 1965 estableció al acuífero en Veda indefinida en cuestión de las aguas subterráneas, considerando el aspecto escaso y condición geohidrológica sobreexplotada (Secretaría de Gobernación, 2015). Actualmente se cuenta con una red de 40 pozos piezométricos los cuales dieron como resultado del muestreo del nivel estático en el periodo de 1970-1995, se alcanzó un abatimiento de 35 m lo que indica una disminución del nivel de 1.4 m/año a causa de la sobreexplotación generando problemas como hundimiento regional (descenso de la superficie) (CNA, 2015).

4.3 Multipiezómetros cercanos a los volcanes del área de estudio

Los pozos de monitoreo de agua subterránea se consideraron, de acuerdo a la disponibilidad de datos, así como la cercanía al área de estudio para cumplir con los propósitos planteados para el trabajo de investigación. Las fuentes prioritarias fueron el trabajo de investigación de Expósito (2012). De los pozos que se muestran en la figura 4.1 solo se consideraron seis los cuales cuentan con un registro

accesible de columnas estratigráficas que representan las características litológicas a profundidad.

A continuación se presenta la tabla en donde se contienen los datos de claves y localización de los pozos (tabla 4.1), mientras que las columnas de los multipiezómetros se muestran en los anexos 4, 6 y 9. También se explica la relación que estas tienen con los datos que se recolectaron en campo para la formación del mapa geológico (figura 3.1).

Pozo de monitoreo PL-137

Esta primera columna geológica se ve representada en la sección geológica B´-B´´ (figura 3.74) en donde se distinguen dos unidades distintas, desde la superficie hasta los 15m de perforación se ubican los depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca, la unidad se compone de suelos (tierra vegetal), limos y arcillas que se intercalan con gravas en las cercanías de los 15m. La unidad profunda son los Flujos piroclásticos San Antonio Acahualco con un espesor de 135 m aproximadamente. Los materiales piroclásticos de la unidad San Antonio Acahualco fueron descritos en el pozo como gravas, arenas y limos intercalados y en el pozo la unidad va de los 48 m y hasta los 150 m (Anexo 4).

Tabla 4.1 Localización de multipiezómetros con registro de columnas estratigráficas. Coordenadas en UTM-WGS84.

Clv Pozo	Coordenadas		Elevación (msnm)	Profundidad del pozo (m)
	X	Y		
PL-137	422298.4	2132198.1	2705.40	150.00
PL-158	430479.55	2129378.53	2705.90	150.00
PL-162	429459.81	2141203.97	2608.80	150.00
PL-163	432417.28	2144112.75	2585.80	150.00
PL-367	420563.90	2141763.25	2606.40	130.00
PL-368	415767.97	2139325.82	2639.80	150.00

Pozo de monitoreo PL-162

Este pozo PL-162 se proyectó en la sección B´-B´´ (figura 3.74) y a partir de esta relación estratigráfica se interpreta que la perforación del pozo atraviesa los primeros depósitos volcánicos del Volcán El Perico, que comprende algunas capas de suelo y luego cortando depósitos piroclásticos del volcán hasta alcanzar los depósitos fluvio-lacustres Santa Juana compuesta de arenas, arcillas, gravas, limos y tobas (Anexo 6).

Pozo de monitoreo PL-368

El pozo proyectado se encuentra a una distancia de 480 m hacia el Sur del trazo de la sección geológica A´-A´´ (figura 3.73). El pozo cortó a profundidad rocas de las unidades geológicas depósitos fluvio-lacustres San Lorenzo Cuauhtenco y flujos piroclásticos San Antonio Acahualco (Anexo 9).

4.4 Relación hidrogeológica entre los volcanes y la cuenca que los rodea

Como se evidencia en la figura 3.1 y en las secciones geológicas (figura 3.2 y 3.3) se hace relación con los datos de las unidades hidrogeológicas en el trabajo de Expósito (2012). La relación implica directamente a zonas en donde hacen contacto los flujos volcánicos de domos y volcanes con las unidades fluvio-lacustres, sedimentarias y de origen volcánico con potencial de infiltración.

Las unidades geológicas definidas en este trabajo permiten hacer una primera aproximación del comportamiento hidrogeológico en función de la porosidad y permeabilidad de estas unidades geológicas con base en las características litológicas. Las unidades porosas en la zona de estudio comprenden a las unidades de los depósitos fluvio-lacustres Santa Juana, San Lorenzo y algunas capas de los depósitos fluvio-lacustres y volcánicos del valle de Toluca. Estas unidades en medio poroso implican la presencia de acuíferos libres y que dependen del espesor de las arenas y gravas así como de la geometría lenticular de los sedimentos fluviales. Los resultados estratigráficos de estas unidades son congruentes con la afirmación de CNA (2015).

Subyaciendo a los depósitos fluvio-lacustres de las unidades Santa Juana, San Lorenzo y de los depósitos fluvio-lacustres del Valle de Toluca se encontró flujos piroclásticos de bloques andesíticos y a veces lahares volcánicos que se interpretaron con un comportamiento impermeable. Estos depósitos piroclásticos a la base de los sedimentos fluvio-lacustres son la parte superior de un acuífero semiconfinado, reconocido por estudios de la CNA (2015), este acuífero confinado debe encontrarse en sedimentos fluviales y aluviales o depósitos de flujos piroclásticos con presencia de oleadas piroclásticas que presentan porosidad y permeabilidad, esto con base a los resultados estratigráficos del presente trabajo.

El medio fracturado desde el punto de vista hidrogeológico se interpretó sobre las laderas de los volcanes definidos en este trabajo, como son volcán El Perico, volcán San Martín, volcán El Molcajete, volcán Cerro del Murciélago, volcán El Aire y los domos volcánicos como La Teresona, los domos Miltepec, domos San Marcos y domos Canoas. En las laderas de estos volcanes se ubican depósitos sedimentarios de abanicos aluviales compuestos de sedimentos arenosos y limos arenosos con bloques de roca volcánica andesítico-dacítica y a veces basáltica; los depósitos presentan agua en sus poros y en tiempo de lluvias llegan alcanzar la saturación total de los poros en algunas zonas dentro del área de estudio.

La zona transicional ubicada al pie de los volcanes en la zona de pie de monte es una zona de que pasa de sedimentos areno-limosos y gravas de abanicos aluviales a los sedimentos fluvio-lacustres de las unidades San Lorenzo, del Valle de Toluca y Santa Juana. Desde el punto de vista hidrogeológico es una zona compleja ya que interactúan un medio poroso y un medio fracturado que se encuentra determinado por derrames lávicos de las estructuras volcánicas. Se interpreta dentro del mapa de zona transicional (figura 5.1) el cual conjuga el comportamiento que del nivel de agua bajo la superficie con la complejidad estructural que presentan los cuerpos volcánicos como lo son volcanes y domos. La presencia de agua subterránea no solo influye en el comportamiento de estratos con particularidades compactables, ya que las estructuras y flujos que presentar propiedades exclusivas como lo son fallas y fracturas que las afectan.

El aporte hidrológico a las unidades porosas se produce a través del contacto entre unidades permeables e impermeables dando paso a la formación de escurrimientos producidos por precipitación, mismos que cambian de dirección al encontrar una barrera impermeable, aportando un caudal en ocasiones que logran infiltrarse de forma menos recurrente a través de fallas y fracturas.

4.5 Controles Estructurales y la influencia en las características hidrogeológicas del área de estudio

Las fracturas y fallas en un sistema hidrogeológico pueden ser importantes factores en la variación de parámetros hidrológicos como la porosidad, permeabilidad, transividad, etc. El acuífero del Valle de Toluca en la parte del área de estudio se muestra que fluye de manera continua hacia la dirección Noreste y Este de acuerdo al trabajo de Expósito (2012); estos datos son de carácter regional y no toman en cuenta la escala local del área de estudio sin embargo faltan datos a esta escala y en este trabajo, referentes a datos en los parámetros hidrogeológicos. En este trabajo se localizaron fallas y fracturas en la zona que rodea a los volcanes y también fracturas dentro de los volcanes.

Algunos controles geológico-estructurales que se pueden definir en base a la presencia de las estructuras es que en la parte alta del acuífero que corresponden a las unidades geológicas fluvio-lacustres compuestas de arenas, limos, y gravas fluviales son porosas y permeables y en ocasiones estos flujos de agua son canalizados a lo largo de fracturas que se puede ver en algunos manantiales y corrientes superficiales como por ejemplo el manantial del Santuario de Ojo de Agua de Almoloya de Juárez, y en el caso de las corrientes superficiales se pueden ver que las corrientes como arroyo Alcantarilla, río Tejalpa, arroyo Guadarrama, río Almoloya, son controlados por fallas y fracturas.

Las zonas de transición que se encuentran en el pie de monte de los volcanes presentan acuíferos de tipo libre y que se encuentran encajonados en sedimentos de limos, arenas y gravas. Estos acuíferos de escala local varían sus niveles freáticos debido a los cambios estacionales. En algunas partes del centro de Toluca

y a lo largo del libramiento de Matlatzincas se observaron bardas casi a punto de caer esto debido al aumento de las presiones de poro en estos lugares. En la figura 5.1 se muestra esta zona de transición es en donde mayor infiltración y escurrimientos suceden, y que también se consideran zonas potenciales para los problemas de deslizamientos de tierra como se verá más adelante.

Las fracturas que se presentan en las estructuras volcánicas en Toluca están presentes en áreas de recarga a escala local y que muchas fracturas son verticales son canales de infiltración para las aguas pluviales que recargan los acuíferos en las zonas fluvio-lacustres del valle de Toluca.

Se interpreta con base a la presencia de fallas y fracturas que están ocultas que es posible que el acuífero confinado de niveles más profundos pueda estar afectado por fallas que se cubren con los depósitos sedimentarios y volcánicos del Valle de Toluca.

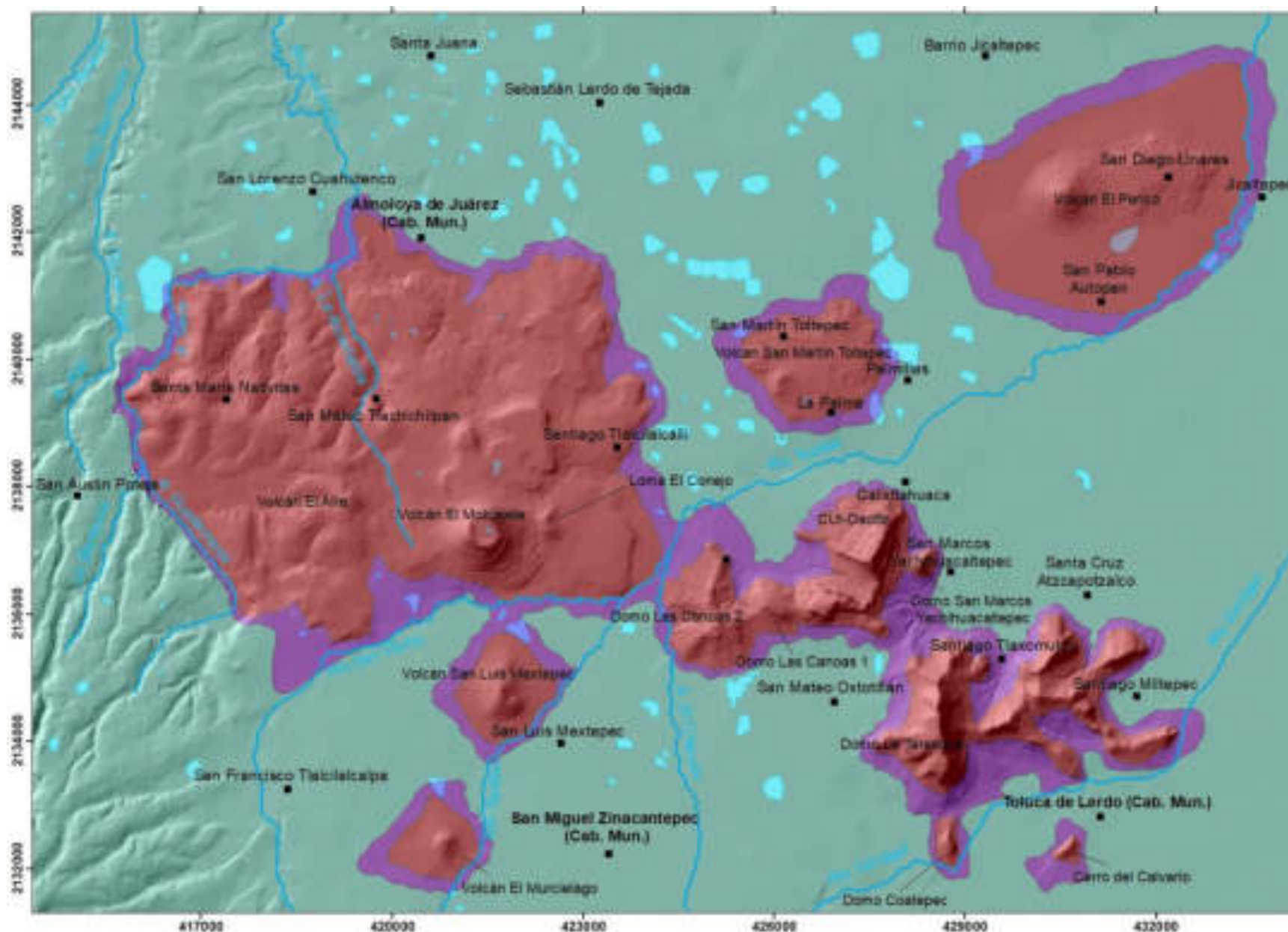
Capítulo 5. Características Geológico-Ambientales

5.1 Zona transicional entre volcanes y acuífero

- Definición de zona transicional

La zona transicional dentro de este trabajo de investigación se considera como el área de contacto geológico que presentan las estructuras volcánicas como derrames lávicos y abanicos aluviales con las unidades fluvio-lacustres, flujos piroclásticos, sedimentarias y volcánicas porosas de las partes bajas y de zonas planas. Se definen directamente en superficie por cambios litológicos y que tienen reflejo en la propiedad del grado de compactación de los materiales.

En la figura 5.1 muestra la zona de transición distinguida como la zona que se encuentra en el cambio de compactabilidad, en donde las áreas compactables y no compactables forman un área intermedia definida como zona transicional. Los materiales compactables están determinados por arenas, limos y arcillas con poros y presencia de agua del acuífero superior que es representado por las unidades fluvio-lacustres definidas en este trabajo (Santa Juana, San Lorenzo Cuauhtenco y los sedimentos del Valle de Toluca). Las unidades no compactables están determinadas por derrames lávicos de los volcanes de Toluca que comprenden rocas andesíticas, basálticas y dacíticas. Este mapa ayudara a determinar con mayor facilidad el comportamiento de los estratos que retienen agua a nivel de zona de transición y límites de subcuencas locales en los bordes de los volcanes y como el descenso de niveles freáticos por extracción de agua subterránea puede llegar a afectar en mayor medida las zonas transicionales al pie de las estructuras volcánicas.



Simbología

Zona Transicional

Categorías

- No Compactable
- Compactable
- Zona transicional

Elementos Topográficos

- Localidades
- Ríos
- Cuerpos de agua



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO, SGM.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Angeles Moreno

Figura 5.1 Mapa de zona transicional.

5.2 Peligros y riesgos geológicos relacionados a fallas y fracturas

Los peligros y/o riesgos que se presentan en este trabajo son de relación directa de datos obtenidos tanto en gabinete como los recolectados en campo, se asocian con la conjunción de las características geológico-estructurales, de litología, el uso de suelo y características acuíferas. Con lo cual se pueden considerar dos peligros y riesgos geológicos potenciales que son los deslizamientos de tierra y la subsidencia hídrica de terreno, considerando las zonas potenciales para desencadenar estos eventos.

En la figura 5.2 que fue definida por Almazán-Vázquez (2017) se representa la influencia de grado de peligro por grietas y fracturas en los bordes de los volcanes del centro del área de estudio por lo cual se considerara para este trabajo y se complementara con información de otras zonas no mostradas. Se identifica la posibilidad de que características como fallas y fracturas evolucionen aumentando la probabilidad de fracturamiento en las zonas transicionales a los volcanes.

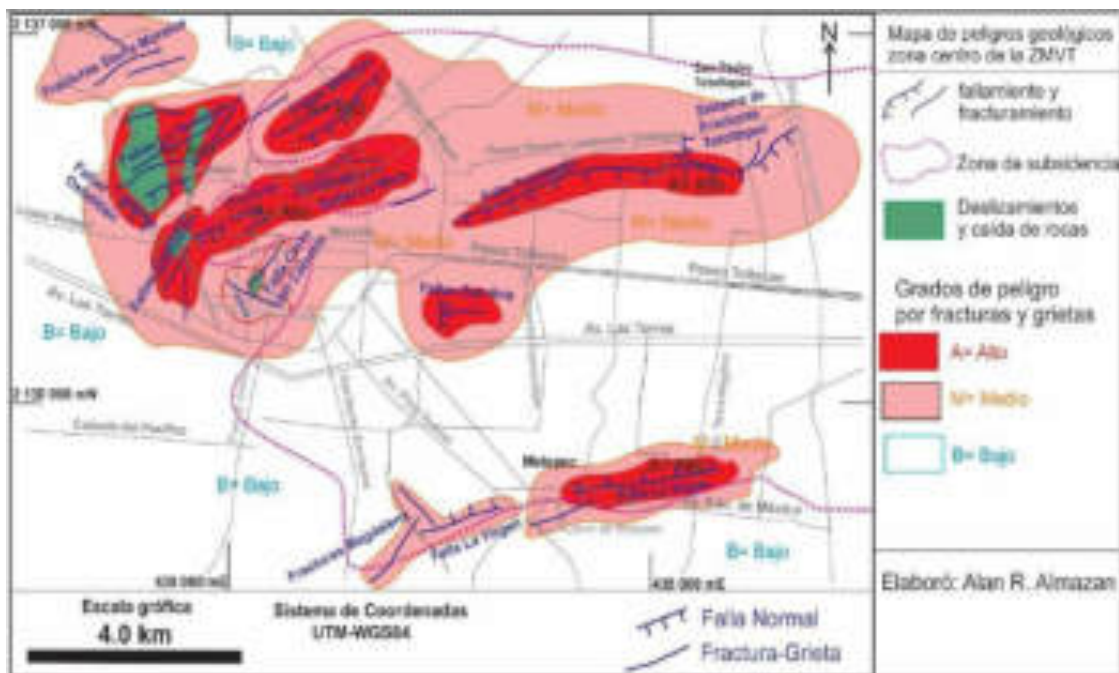


Figura 5.2 Mapa de peligros geológicos (Almazán-Vázquez, 2017).

5.2.1 Identificación de zonas de deslizamiento de tierra

Para determinar el mapa de zonas de deslizamientos se requirió de insumos cartográficos los cuales a través de la superposición de capas determinan las zonas de mayor probabilidad por medio de la interpolación de coincidencias de las características del medio físico disponibles para la determinación de deslizamientos.

Para integrar los factores naturales que pueden ser desencadenantes de deslizamientos y aplicados a la zona de estudio de este trabajo se empleó la metodología propuesta por Keller et al. (2007). Esta metodología busca determinar la susceptibilidad de los deslizamientos con las variables geología, pendiente, clima, uso de suelo y agua. Esta metodología la describe Keller en su libro “*Riesgos Naturales*”. En la figura 5.9 se muestra el esquema metodológico basado en la propuesta de Keller et al. (2007) y aplicado a este trabajo para determinar al final las zonas potenciales a deslizamientos, aplicando conocimientos en el tema de superposición de mapas para una cartografía temática del medio físico del García-Abad (2002).

El caso de estudio requirió de los datos disponibles como fueron:

- *Mapa geológico (Mapa litológico y geológico estructural):*

En la variable geología, se emplean los resultados de este trabajo expresados en el mapa geológico de la figura 3.1, también se consideraron los valores litológicos y características del mapa de Almazán-Vázquez (2017) mostrados en la figura 5.2 y por último los datos geológico-estructurales de este trabajo mostrados en la figura 3.90 (mapa geológico estructural). Se determinaron con esta integración de datos zonas de coincidencia de características geológicas y que fueron 3 diferentes tipos de zonas de coincidencia, simbolizadas por un color. El color rojo representa a zonas de mayor grado a que ocurra un deslizamiento, color amarillo las zonas de grado medio y color verde las de grado bajo. Estos tipos de zonas de coincidencia se pueden ver en la figura 5.4.

- *Mapa de pendientes (Mapa de pendientes de ladera o topografía):*

Para el caso del mapa de pendientes (figura 5.5) se realizó con metadatos del mapa geológico del Estado de México realizado por INFOMEGEM (2017), se utilizó el archivo en formato *shapfile* de curvas de nivel del estado con una separación de 10 metros entre cada curva y tomando en cuenta la clasificación de pendientes de propuesta por Aceves et al. (2014) la cual se presenta en la tabla 5.1. Las pendientes mayores por arriba de 30° de caída libre y deslizamiento aparecen en las estructuras volcánicas del centro de Toluca y en específico en los domos volcánicos andesítico-dacíticos. Pendientes de 12° a 30° se muestran en color amarillo y comprende laderas de los volcanes tanto de los domos y algunos conos cineríticos, pero también las laderas de las cañadas y barrancas entre los flujos piroclásticos y barrancas entre los derrames lávicos de andesita, basalto o dacita.

- *Mapa de clima:*

El mapa de clima (figura 5.6) brinda información de utilidad como un factor para la estimación de las zonas con probabilidad de deslizamiento. Este mapa se realizó empleando la información de archivo en formato *Shape file* de climas del Estado de México actualizado en 2017 de IFOMEGEM. El resultado muestra que en la zona de los domos volcánicos andesítico-dacíticos de Toluca existe un clima diferente al resto del área que rodea a los volcanes y sugiere mayor humedad en la zona de los domos volcánicos del centro de Toluca.

- *Mapa de uso de suelo:*

Se enfoca específicamente en la condición y ocupación que tiene el suelo. El mapa de uso de suelo se realizó para este trabajo de tesis por medio de la digitalización de imágenes satelitales adquiridas de Google Earth (2017) ya que en esta plataforma se evidencian de forma directa el cambio de uso de suelo que periódicamente se mantiene actualizada, y adicionalmente se emplearon capas de archivos en formato *shapfile* de IFOMEGEM (2012). La deforestación en el área de estudio está relacionada con el uso de suelo en actividades agrícolas, así como el uso urbano, y se puede ver que las laderas de los domos volcánicos del centro

de Toluca están afectadas y perturbadas en la vegetación ya que se encuentran pastizales. En otras laderas de los volcanes se presentan usos de suelo de tipo urbano. La vegetación nativa en el área de estudio prácticamente ya es inexistente. La presencia de estas condiciones provoca que aumente la probabilidad de derrumbes y deslizamientos hacia las laderas de volcanes y en barrancas profundas.

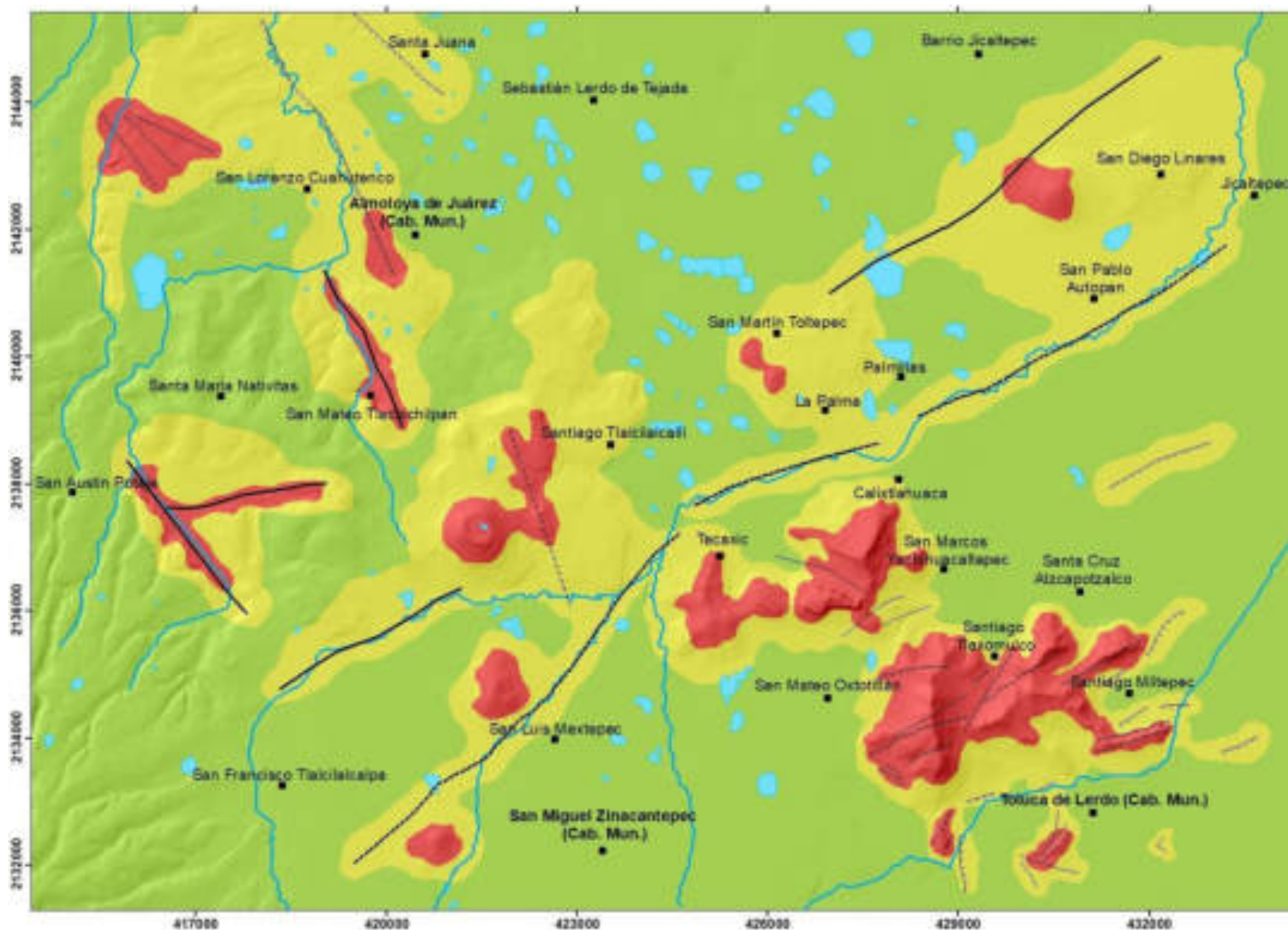
La figura 5.7 (Mapa de uso de suelo) muestra polígonos de uso de suelo como lo es; cuerpos de agua, área urbana, agricultura, pastizal y bosque nativo.

- *Presencia de agua:*

El agua es un factor directo o indirecto como detonante de deslizamientos y que depende de cambios estacionales en el año. Las corrientes superficiales representan otro factor de importancia en el caso de deslizamientos, ya que la erosión puede debilitar capas o dejar expuesto los estratos de materiales profundos y esto provoca debilitamiento en fuerzas de cohesión de estratos. En el análisis de factores que desencadenan deslizamientos también el agua es un factor desencadenante. En este trabajo se integran los resultados hidrológicos mostrados en la figura 5.8, el cual integra variantes como lo son corrientes superficiales perennes e intermitentes y cuerpos de agua.

Tabla 5.1. Clasificación de rango de pendientes realizada con datos de Aceves et al. (2014).

Rango	Grado de inclinación	Clasificación
1	0°-3°	Plano (Planicie)
2	3°-12°	Ligeramente inclinado
3	12°-30°	Deslizamiento
4	30°-45°	Deslizamiento
5	>45°	Caída libre



Simbología

Elementos Estructurales

- Falla normal
- - - - - Falla normal inferida
- Fractura
- - - - - Fractura inferida

Elementos Topográficos

- Localidades
- Ríos
- Cuerpos de agua

Zonas de coincidencia de características geológicas

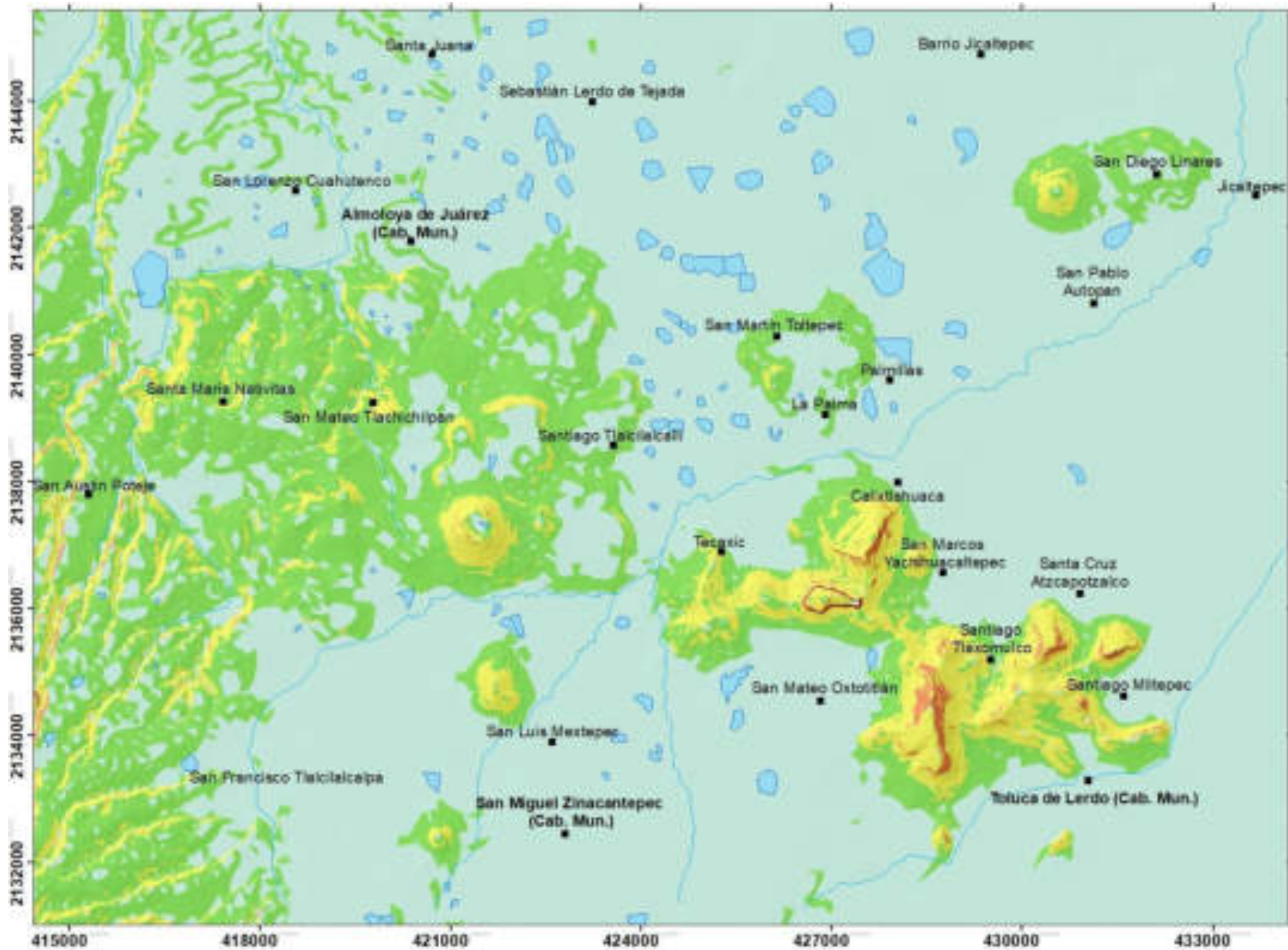
- Baja coincidencia
- Media coincidencia
- Alta coincidencia



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO, SGM.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno

Figura 5.4 Mapa de geológico (coincidencias de características geológicas).



Simbología

Elementos Topográficos

- Cabecera municipal
- Ríos
- Cuerpos de agua

Clasificación de pendiente

- 0-3 Plano (Planicie)
- 3-12 Ligeramente inclinado
- 12-30 Deslizamiento
- 30-45 Deslizamiento
- >45 Calda libre



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno

Figura 5.5 Mapa de pendientes.

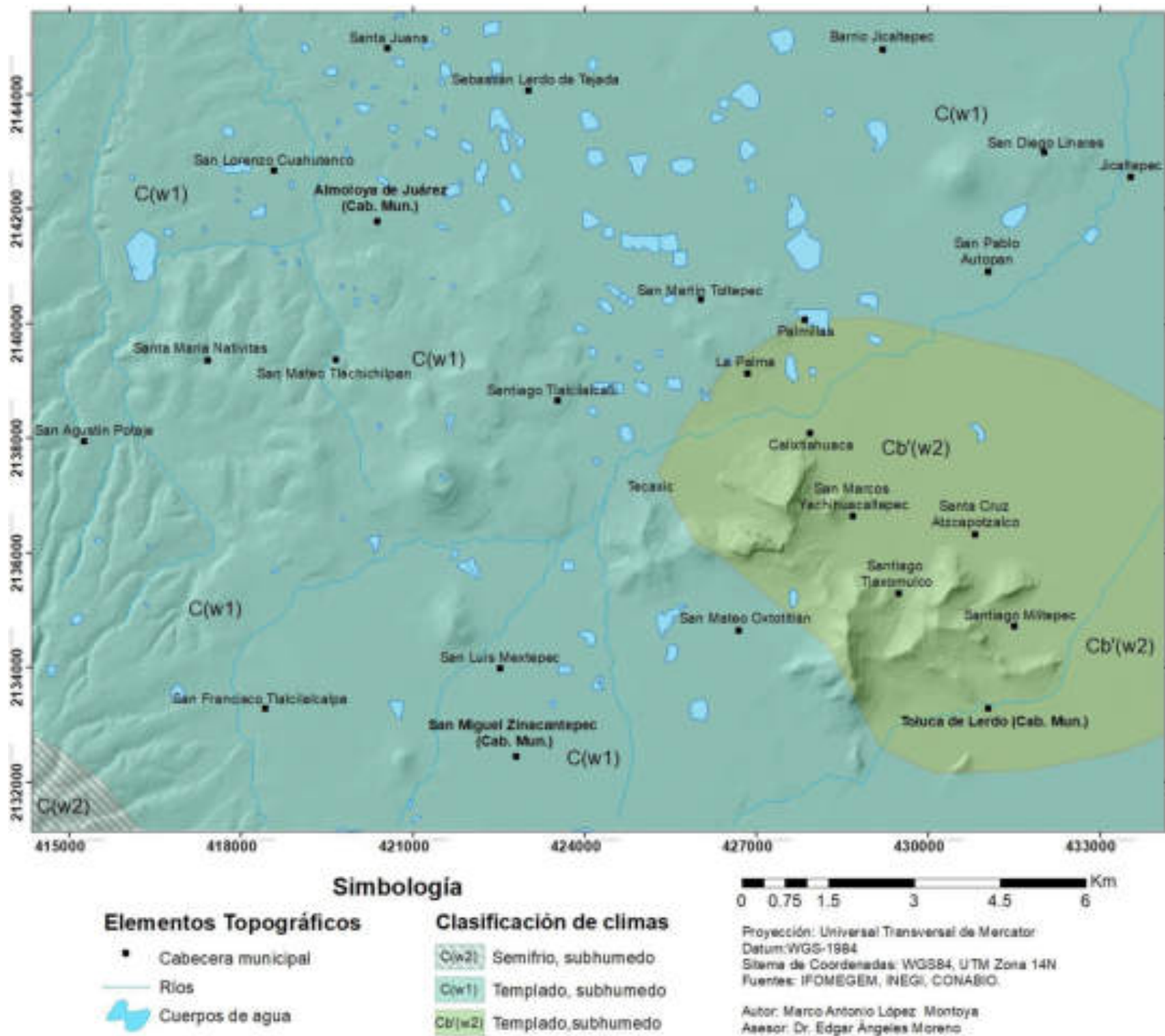
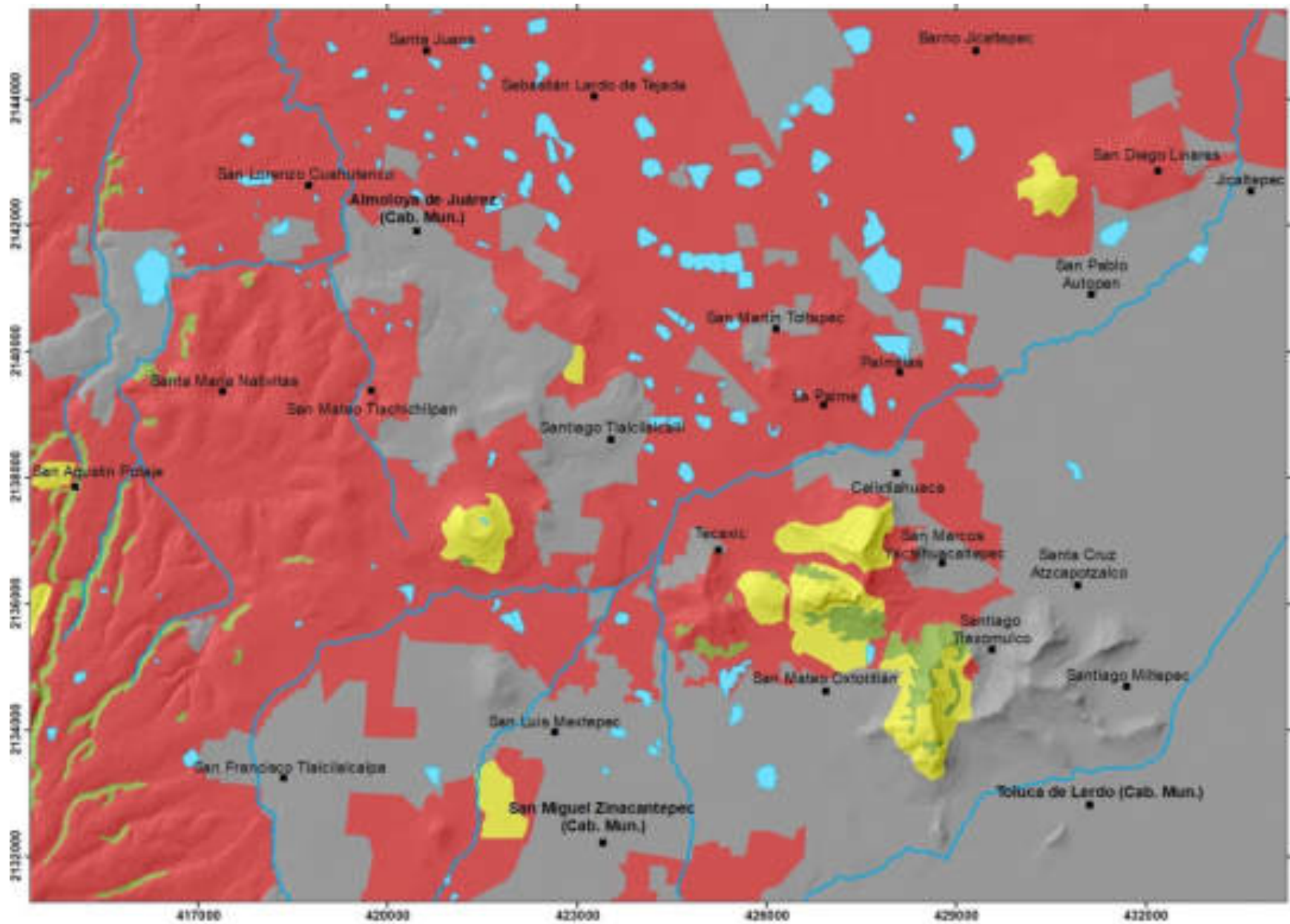


Figura 5.6 Mapa de climas.



Simbología

Elementos Topográficos

- Localidades
- Ríos
- Cuerpos de agua

Uso de Suelo

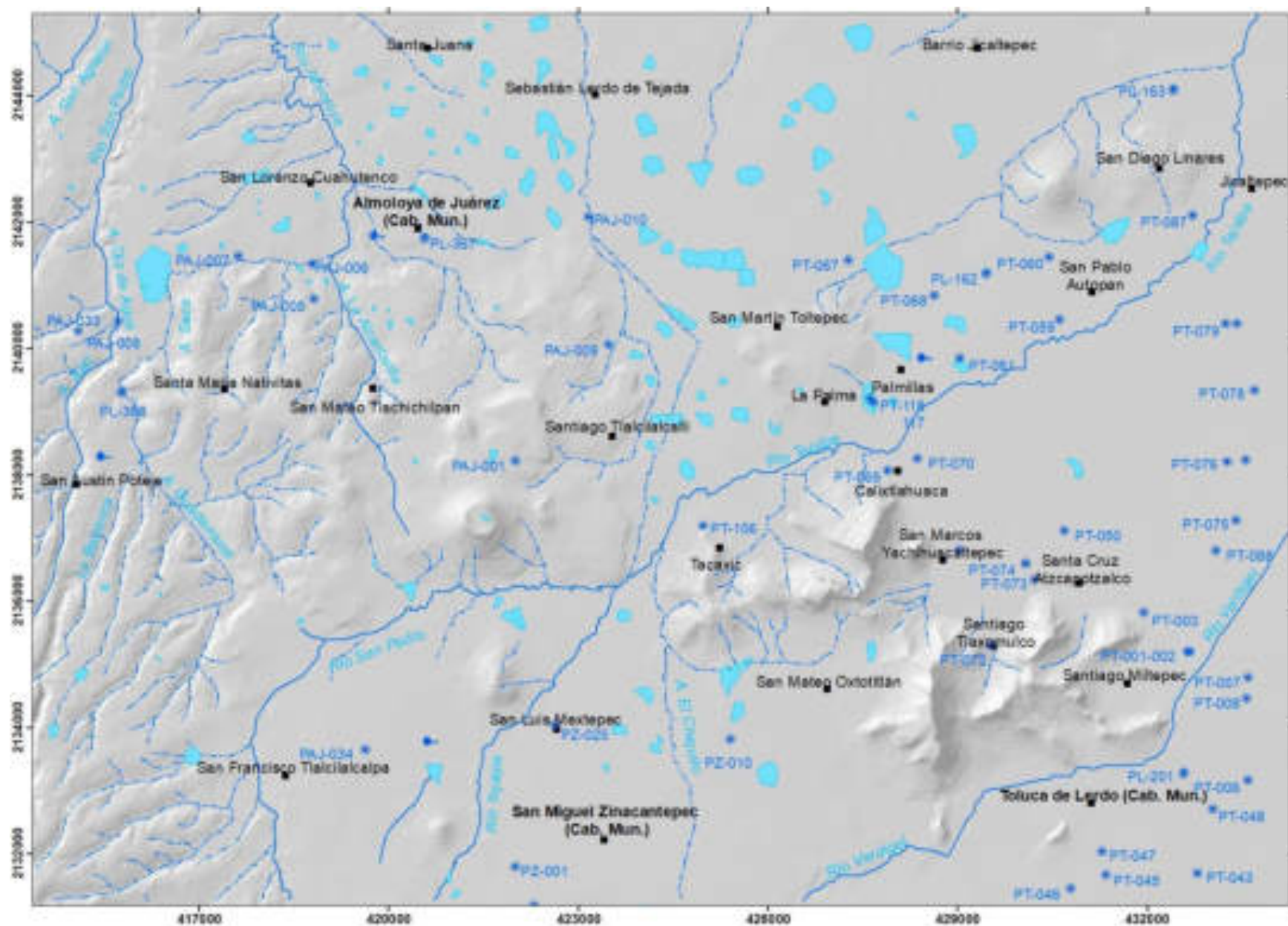
- Área urbana
- Agricultura
- Vegetación nativa
- Pastizal



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, Google Earth.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno

Figura 5.7 Mapa de uso de suelo.



Simbología

Elementos Topográficos

- Localidades

Elementos Hidrológicos

- Pozos
- Manantial
- Ríos perenes
- Ríos intermitentes
- Cuerpos de agua



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, Expósito (2012)

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno

Figura 5.8 Mapa de presencia de agua.

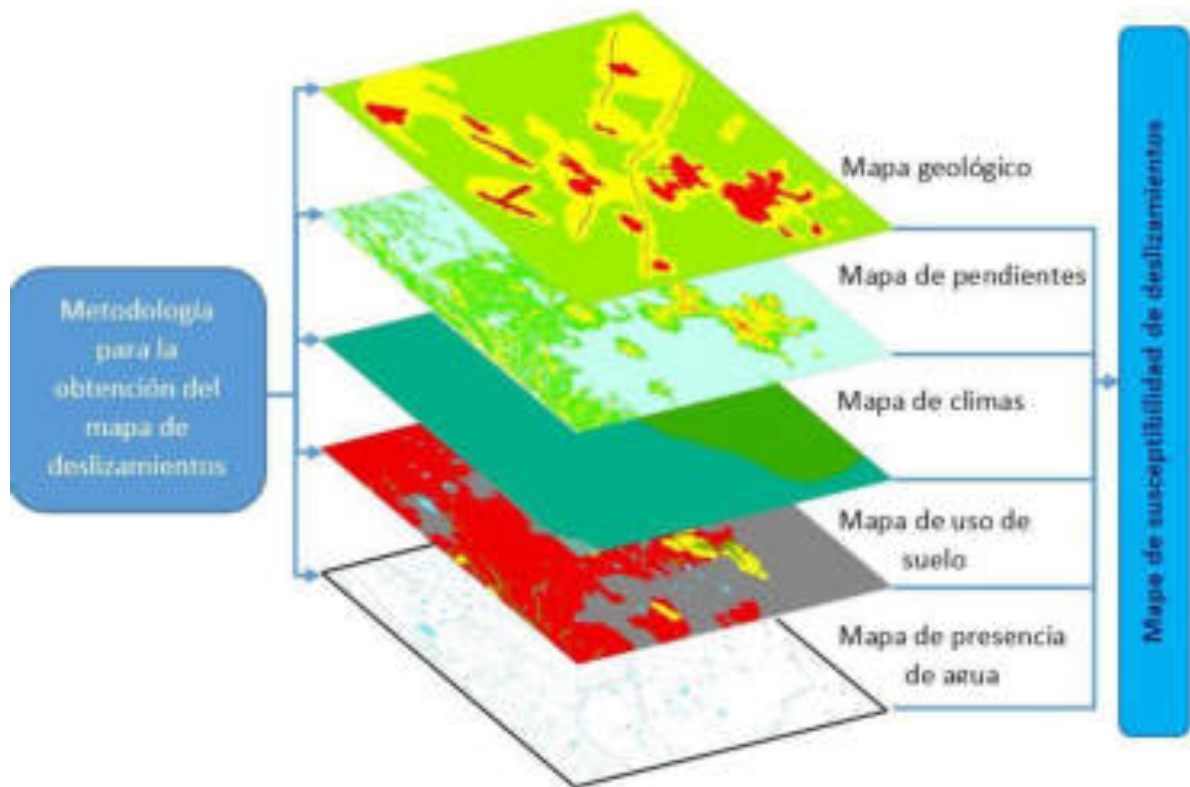


Figura 5.9 Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas para la obtención del mapa de susceptibilidad de deslizamientos.

- **Zonas susceptibles de deslizamientos**

En este trabajo se determina la susceptibilidad de deslizamientos (figura 5.10), para esta parte se toman en cuenta las variables ya mencionadas en anteriores apartados (geología, clima, uso de suelo, pendientes e hidrología). Se asigna un valor para cada categoría resultado del análisis cartográfico, considerando su grado de influencia en los deslizamientos, los valores se muestran en la tabla 5.2, y se utiliza el método de la utilización de unidades geométricas artificiales considerando el espacio que contiene múltiples datos e información irregular, causal o aleatoriamente distribuida (García-Abad, 2017). En casos particulares como fue en el clima se asignó un mismo valor para ambos tipos de climas ya que debido a que se encuentran dentro de la misma cuenca la variación es mínima. En el mapa de pendientes se consideró a los dos últimos valores del mapa como el número máximo 2, ya que de acuerdo a lo observado en campo suele haber zonas con este grado de inclinación con problemas de deslizamientos.

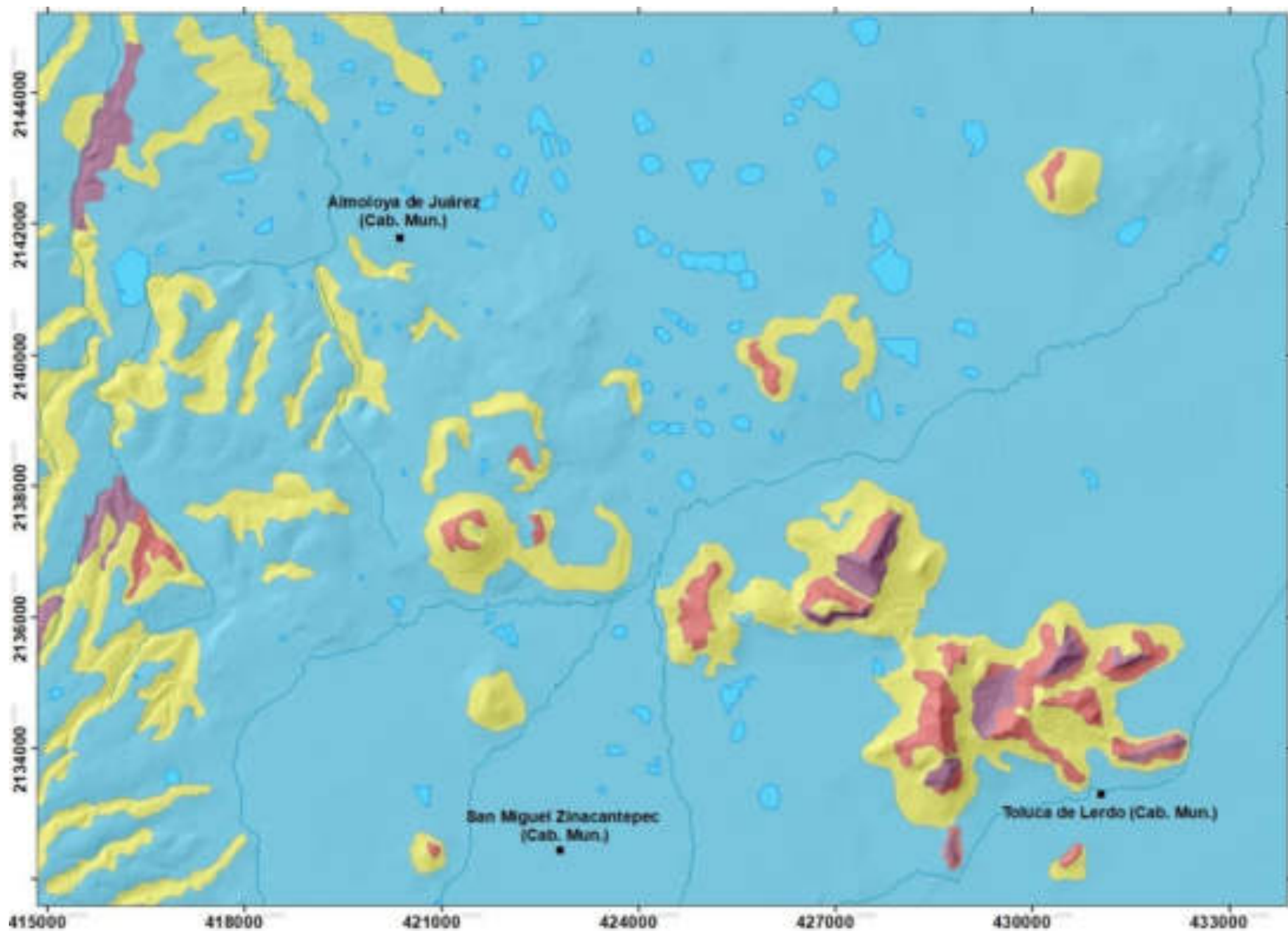
Tabla 5.2 Valores asignados a características de mapas integrados en la metodología para la realización del mapa de susceptibilidad de deslizamientos.

Mapa	Valores de mapa	Valores asignados
Mapa geológico	Baja coincidencia	0
	Media coincidencia	1
	Alta coincidencia	2
Mapa de pendientes	0-3 planicie	0
	3-12 ligeramente inclinado	0
	12-30 deslizamiento	1
	30-45 deslizamiento	2
	>45 caída libre	2
Mapa de clima	C(w1) Templado subhúmedo	1
	Cb'(w2) Templado subhúmedo	1
Mapa de uso de suelo	Área urbana	2
	Agricultura	1
	Vegetación Nativa	0
	Pastizal	1
Mapa de presencia de agua	Ríos perenes	2
	Ríos intermitentes	1

Los valores asignados de la tabla 5.2 se combinaron mediante la sobre posición de mapas en el software de ARCGIS. Los resultados muestran zonas de muy alta susceptibilidad de deslizamientos en donde se consideran combinaciones con valores más altos; zonas de alta susceptibilidad de deslizamiento considerando al menos dos valores altos y tres valores medios; zonas de mediana susceptibilidad de deslizamientos considera cinco valores medios o bien tres valores medios y dos valores nulos, y para las zonas de baja susceptibilidad se contemplan como cuatro valores nulos o bien de cinco características tres valores nulos y dos o menos con valor medio.

Al interpretar los resultados, se puede ver que la susceptibilidad alta y muy alta comprende las laderas y escarpes de los derrames lávicos como las unidades geológicas de domo La Teresona, unidad Cerro de Coatepec, domos Santiago Miltepec, domos San Marcos Yachihualtepec, domos Las Canoas y algunas

laderas de los volcanes de El Molcajete, volcán El Perico y volcán San Martín Toltepec. Moderada susceptibilidad se presenta en las laderas de pie de monte de los volcanes de Toluca y se puede ver que coincide con en cierta medida con las zonas transicionales y con la zona definida como riesgo sísmico; este análisis muestra que la zona de grado medio es una zona de riesgo sísmico y de deslizamientos que pueden ser desencadenados por terremotos. En estos volcanes no todas las laderas presentan susceptibilidad alta pero es ya una primera aproximación a considerar en el desarrollo horizontal de la zona urbana de Toluca.



Simbología

Elementos Topográficos

- Cabecera municipal
- Ríos
- Cuerpos de agua

Susceptibilidad de deslizamientos

- Muy Alto -Deslizamiento con caída libre
- Alto -Deslizamiento
- Medio Moderadamente inclinado
- Bajo Planicie o fuera de riesgo



Proyección: Universal Transversal de Mercator
 Datum: WGS-1984
 Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
 Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO, Expósito (2012),
 Almazán-Velázquez (2017), SGM.

Autor: Marco Antonio López Montoya
 Asesor: Dr. Edgar Angeles Moreno

Figura 5.10 Mapa de susceptibilidad de deslizamientos.

El mapa de subsidencia de Almazán-Vázquez (2017) considera datos estructurales de fallas y fracturas, algunas de las cuales son el camino que sigue el movimiento de la subsidencia La Comisión Nacional del Agua (CNA) (2015) publicó en 2015 en el Diario Oficial de la Federación que las extracciones de agua subterránea rebasaron el potencial del acuífero, mismo que se reflejaba en abatimientos de nivel piezómetros y la formación de grietas.

En la figura 5.12 se presenta el esquema metodológico seguido para integrar algunos de los resultados del trabajo de Almazán-Vázquez (2017) (figura 5.2) considerando solo la porción central a la que se enfoca su trabajo, mapa de uso de suelo (figura 5.7), los resultados de este trabajo de la zona transicional (figura 5.1) y mapa geológico estructural (figura 3.90). Se ha adaptado la metodología empleada para deslizamientos ya que cuentan con características de requerimientos de información similares a la cartografía temática del medio físico presente en García-Abad (2002).

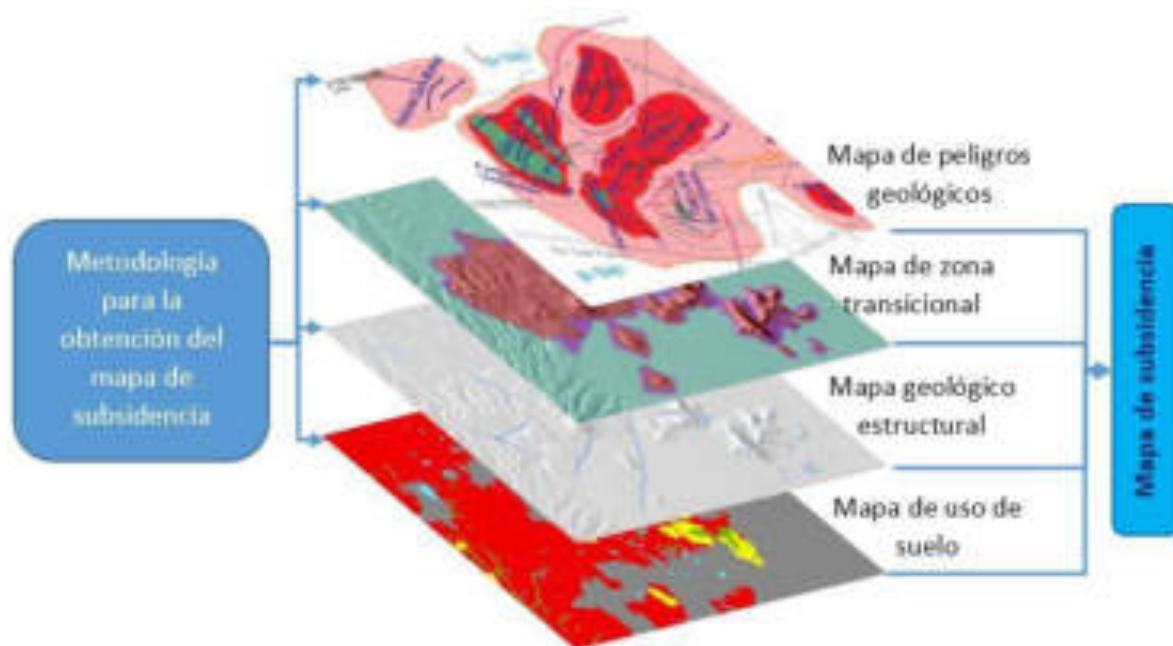


Figura 5.12 Esquema metodológico que muestra las metodologías empleadas para la obtención del mapa de subsidencia.

El resultado de integrar las capas de información mostradas en la figura 5.12 es un mapa de subsidencia (figura 5.13). En este mapa se puede ver que el mapa se compone de dos valores, aquellas zonas en color azul representan las zonas en donde la ocurrencia de subsidencia es mínima o nula y las zonas en color rojo representan los lugares con potencial de generar subsidencia de acuerdo a las coincidencias en características de los mapas presentados por medio de la interpolación en la superposición de capas.

Los resultados muestran que las áreas de subsidencia están localizadas en el centro de Toluca y ahí hay un traslape con las zonas de transición en los bordes de los volcanes, y estas zonas también coinciden con la presencia de grietas, y algunas fracturas y fallas ya definidas en trabajos anteriores.

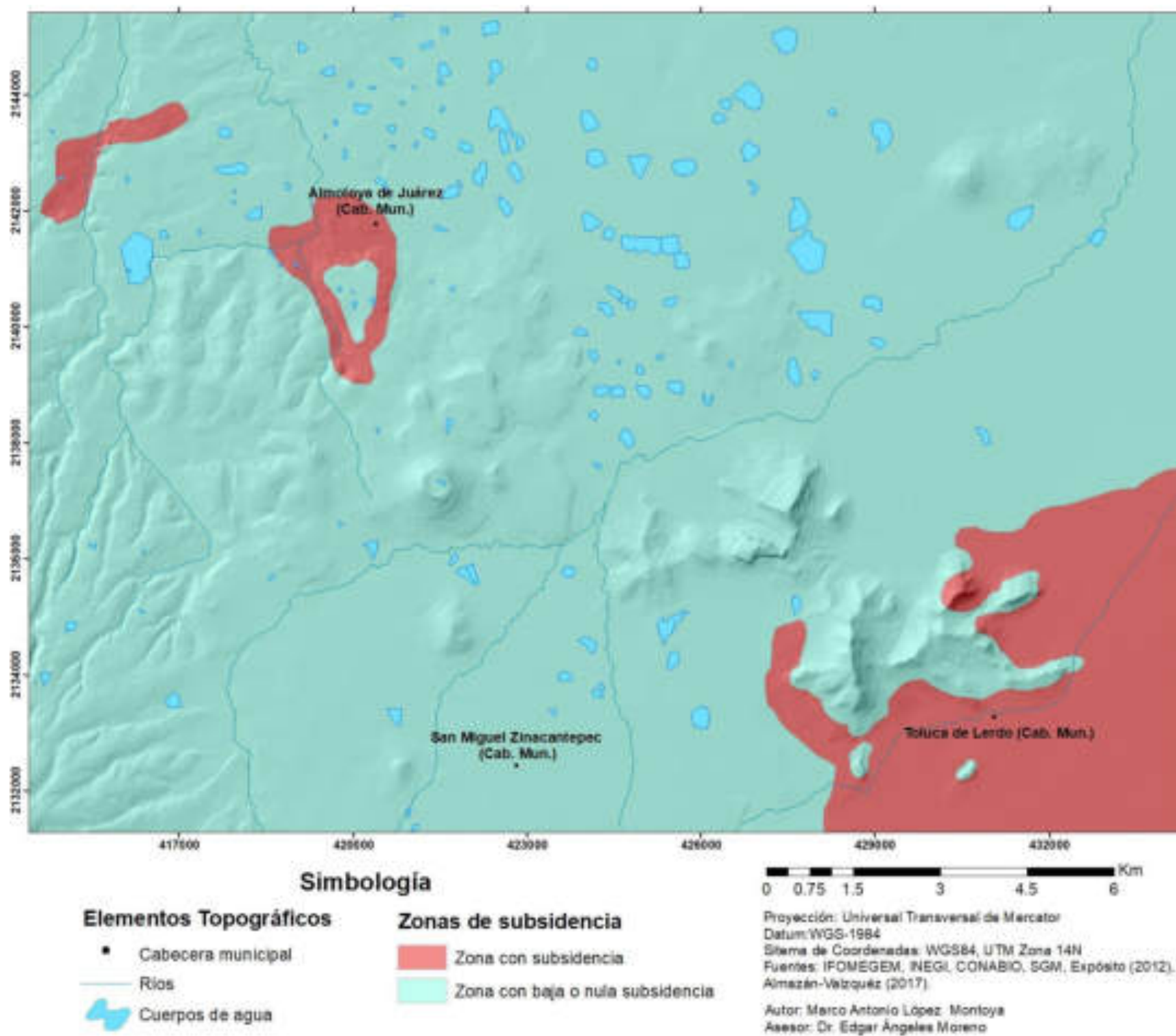


Figura 5.13 Mapa de subsidencia.

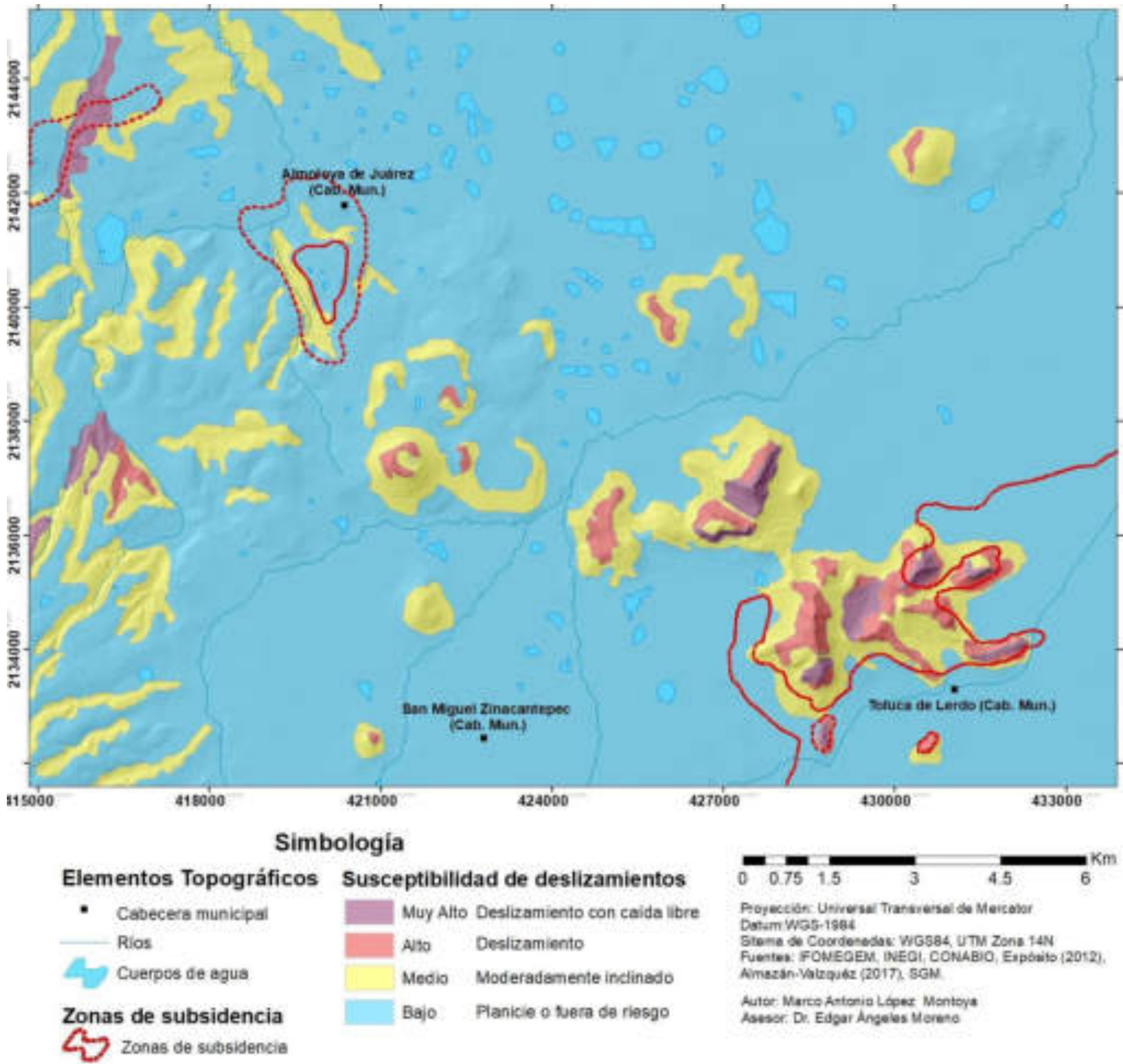


Figura 5.14 Mapa de peligros (Cartografía geológico-ambiental).

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se define por primera vez para la zona centro de Toluca una cartografía geológica y una columna estratigráfica que permite definir a unidades volcánicas, sedimentarias y volcanoclásticas. Las relaciones de estas unidades permiten ver que la estratigrafía comprende depósitos sedimentarios fluvio-lacustres de varios niveles estratigráficos, que se presentan cubiertos por derrames lávicos o depósitos de caída pero también están estratificados con flujos piroclásticos que fueron derivados del Volcán San Antonio, Nevado de Toluca y domos volcánicos en el centro de Toluca. Las edades de estas unidades están ubicadas dentro del Plio-Cuaternario.

En este trabajo se identificaron nuevas fracturas y fallas geológicas. Las fracturas y fallas presentan direcciones de NE-SW y NW-SE. Las fracturas afectan a depósitos piroclásticos del Valle de Toluca y a los niveles superiores fluvio-lacustres. Las fallas y fracturas también afectan a domos volcánicos y a algunos conos cineríticos. Estas evidencias sugieren que existen fracturas y fallas que han tenido actividad en el Cuaternario.

Las fracturas y fallas definidas en este trabajo controlan algunos cauces de ríos y arroyos superficiales. Este nivel de control estructural es a nivel del acuífero libre en donde se localizan las unidades fluvio-lacustres.

Los niveles más profundos en el acuífero confinado aún no hay certidumbre de que sea controlado estructuralmente por fallas, ya que faltan datos hidrogeológicos de mayor profundidad.

La cartografía geológico-ambiental y la integración de capas de información referentes a la litología, geología estructural, hidrología, uso de suelo, clima y pendientes permitió definir varios peligros y riesgos geológicos para el área de estudio; estos comprenden una zona transicional vulnerable, zonas de deslizamientos y zonas de subsidencia hídrica.

La zona transicional que se definió en este trabajo es vulnerable ante el desarrollo de grietas por subsidencia hídrica, así como es vulnerable ante la ocurrencia de un sismo. La identificación de la zona transicional se determina gracias a variables como: el comportamiento de fallas y fracturas en las cercanías a zonas no compactables, y el comportamiento que el agua tiene en relación a estas. La información de extracción de agua del acuífero ayudo a determinar la subsidencia hídrica que se evidencia en superficie por fracturamientos y agrietamientos, influenciados por cambios estructurales en cavidades porosas del acuífero debido al cambio de uso de suelo en superficie o la modificación por debajo de la superficie.

En este trabajo se definieron varios peligros geológicos que pueden ocurrir como deslizamientos de tierra, subsidencia hídrica y fracturamiento y agrietamiento.

Se define como las áreas de mayor grado de exposición a deslizamientos las localidades de: San Mateo Oxtotitlán, San Marcos Yachihuacaltepec, cerro El Tencho, La Mora, Santiago Miltepec, Santiago Tlaxomulco, Cerro de Coatepec, La Hortaliza, Santiaguito Tlalcilacalli, San Martín Toltepec y Tecaxic.

A partir de los resultados de este trabajo de tesis, las recomendaciones en futuros estudios de la zona de los volcanes de Toluca que se sugieren son:

La actualización de datos geológicos e hidrológicos a escala de detalle de los bordes de áreas urbanas (zona transicional) debido al incremento poblacional que día con día demanda territorio y servicios obtenidos del mismo acuífero.

Debido a las afectaciones que se tienen dentro del área de estudio por deslizamientos y subsidencia se recomienda realizar un monitoreo de las áreas con mayor afectaciones lo que hará posible una mejor planeación urbana en donde la población no se encuentre expuesta a estos peligros, dejando fuera de riesgo las pérdidas humanas y materiales evitando cuestiones a futuro de consecuencias para recuperación de zonas con posibles afectaciones.

Se recomienda realizar estudios geofísicos para definir de manera exacta la zona transicional, que al ser un tema de vital importancia ante la ocurrencia de actividad sísmica que repercute con mayor magnitud en esta porción. Adecuando técnicas

de construcción apropiadas, así como la implementación de materiales debidos evitando pérdidas económicas en construcciones públicas y privadas.

Se recomienda actualizar datos de parámetros hidrogeológicos a escala de la zona centro de Toluca para encontrar con mayor precisión influencias del fracturamiento en los niveles del acuífero. Así también estos datos permitirán determinar la situación del acuífero del Valle de Toluca para el centro de Toluca y para justificar la extracción que se realiza, y establecer relaciones más de escalas locales en relación con peligros y riesgos geológicos. Estos datos que se obtengan permitirán integrarse con planes de conservación y desarrollo urbano en relación con las condiciones del acuífero mismo que evitara la ocurrencia de problemas relacionados a deslizamientos y subsidencia.

Referencias

Aceves, F., Legorreta, G., Álvarez, Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 66, núm. 2, pp. 329-342.

Alanís-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Morán-Zenteno, D., Alba- Aldave, L. (2002^a). Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 118, pp. 1-14.

Almazán-Vázquez, A. (2017). Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio morfoestructural. UAEMÉX: México.

Aguirre-Díaz, G., Zúñiga-Dávila, F., Pacheco-Alvarado, F., Guzmán-Speziale, M., Nieto-Obregón, J. (2000). El graben de Querétaro, México. observaciones de fallamiento activo. vol. 20 núm. 1, pp. 2-7. UNAM. México.

Antón, D. y Díaz, C. (2000). Sequias en un mundo de agua. Ed. PiriGuazú Ediciones y CIRA-UAEMÉX; México: Uruguay.

Arce, J., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J., Macías-Romo, M., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. vol. 67, núm. 2, pp. 123-143.

Ariel Consultores, S.A. (1996). Estudio de simulación hidrodinámica y diseño de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca. Acuífero de Toluca, Tomo 1. 235 pp.

Asencio, V. (2008). Riesgos geológicos.

Blatter, D., Carmichael, I., Deino, A., Renne, P. (2001). Neogene volcanism at the front of the central Mexican volcanic belt: basaltic andesites to dacites, with contemporaneous shoshonites and high-TiO₂ lava: Geological Society of America. Boletín vol. 113, núm. 10, pp. 1324-1342.

Bloomfield, K., Valastro, S. (1974). Late Pleistocene eruptive history of Nevado de Toluca volcano, central Mexico: Geological Society of America Bulletin, vol. 85, pp. 901–906.

Bloomfield, K. (1974). The age and significance of the Tenango Basalt, Central Mexico: Bulletin of Volcanology, vol. 37, pp. 586-595.

Capra, L., Macías, J., Garduño, V. (1997). The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, México: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera: Geofísica Internacional, vol. 36, pp. 161-179.

Cardona, O. (1993). Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados, Anexos, in Los desastres no son naturales, La Red, pp. 75-93

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara-Durán, C., González-Hernández, M., Centeno-Salas, F. (2017). Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de Septiembre de 2017. UNAM. México.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2006). Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México.

Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. (2002). Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero Valle de Toluca, Estado de México. Toluca, Estado de México: Unidad de Comunicación Social de la Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional del Agua (CNA-Desarrollo y Sistemas, S.A.). (2005). Zonas de reserva de agua potable para la ciudad de Toluca. México

Comisión Nacional del Agua (CNA). (2009). Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea del acuífero 1501, Valle de Toluca, Estado de México.

Comisión Nacional del Agua (CNA) (2015). Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea del acuífero 1501, Valle de Toluca, Estado de México.

Coordinación Municipal de Protección Civil Toluca. (2016). Atlas de Riesgo, *Antecedentes del Río Verdiguél.*

Corapcioglu, M. (1984). Land subsidence a state of the art review: *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, NATO ASI Series (82), pp. 369-444.

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Instituto de Geología*, vol. 2, pp. 172-187.

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. Toluca: México.

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica ·Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. vol. LIII, pp. 84-92.

García-Abad, J. (2002). Cartografía ambiental. Desarrollo de propuestas de sistematización. *Observatorio medioambiental*, vol. 5, pp. 47-78.

García-Palomo, A., Macías, J., Garduño, V. (2000). Miocene to Holocene structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, central Mexico: Tectonophysics, vol. 318, pp. 281–302.

García Palomo, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J. (2002). Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the

Trans-Mexican Volcanic Belt. Geofísica Internacional, vol. 41, núm. 2, pp. 133-150. UNAM. México.

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

Garduño-Monroy V., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres, G. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 18. núm. 1. P. 37-54.

Google Earth Pro. (2017). Imágenes Satelitales.(Programa).

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Querétaro: México.

Gregorio, J. (2017). Secciones Geológicas en RecMin; Mine Engineering Superintendent at CVG Ferrominera Orinoco C.A.: Venezuela

Hernández-Conde, I. (2014). Análisis de subsidencia del terreno en el valle de Toluca a partir del método dual pair interferometry (dpi). Uaeméx: México.

Hernández, D. (2018). Contaminación de los acuíferos. En sitio: <https://geologicalmanblog.wordpress.com/2018/03/28/la-contaminacion-de-los-acuiferos/>.

Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEN). (2009). Atlas Geológico Ambiental del Estado de México. Centro de Geociencias de la UNAM: Gobierno del Estado de México.

Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM). (2012). Carta Geológica del Estado de México: México.

Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM). (2017). Actualización de Carta Geológica del Estado de México: México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). Carta Topográfica, San Miguel Zinacantepec E14A37. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). Carta Topográfica, Toluca de Lerdo E14A38. México.

Keller, E., Blodgett, R. (2004). Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Ed. Pearson, Madrid: España.

Keller, E., Blodgett, R. (2007). Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra, como Riesgos, Desastres y Catástrofes. Ed. Pearson, Madrid: España.

Macías, J., García-Palomo, A., Arce, J., Siebe, C., Espindola, J., Komorowski, J., Scott, K. (1997). Late Pleistocene–Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlán volcanoes, central Mexico, in Kowallis, B.J., ed., Proterozoic to recent stratigraphy, tectonics, and volcanology, Utah, Nevada, southern Idaho and central Mexico: Brigham Young University Geology Studies, pp. 493–52.

Martín-Del Pozzo, A. (1982). Monogenetic volcanism in Si Chichinautzin, Mexico: Bulletin of Volcanology, vol. 45, pp. 9-24.

Montgomery, M. (2008). La transformación urbana del mundo en desarrollo. Science. vol. 319, núm. 5864, pp. 761-764.

Norini, G., Gropelli, G., Lagmay, A. M. F. y Capra, L. (2006). Recent left-oblique slip faulting in central Trans-Mexican Volcanic Belt: Seismic hazard and geodynamic implications: Tectonics, vol. 25., pp. 1-21.

Osete, M., Ruíz-Martínez, V., Caballero, C. (2000). Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: palaeomagnetic and radiometric evidence.

Padilla, F. (2012). Geología aplicada.

Pasquaré, G., Garduño, V., Tibaldi, A., Ferrari, M. (1988). Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: Tectonophysics, vol. 146, pp. 353-364.

Prokopovich, N. (1979). Genetic classification on land subsidence. En: Saxena, S.K. (ed.). Evaluation and prediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, pp. 389-399.

Protección civil (2016). Curso Causas que propician deslizamientos y medidas de prevención. México.

Roldán-Quintana, J., Aguirre-Díaz, G., Rodríguez-Castañeda, J. (2001). Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. Revista Mexicana de ciencias geológica. vol. 28 núm. 1.

Scott, R.F. (1979). Subsidence – A review. En: Saxena, S.K. (ed.). Evaluation and prediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, pp. 1-25.

Secretaría de Gobernación (SEGOB). (2015). Diario Oficial de la Federación 20 de abril de 2015.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2002). Carta Geológico-minera, Ciudad de México E14-2: México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1997). Carta Geológico-minera, Ciudad de México E14-2: México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2016). Hidrogeología. En sitio: <https://www.gob.mx/sgm/acciones-y-programas/programa-de-hidrogeologia>

Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI). (2010). Terminología de defensa Nacional. Perú.

Tomás, R., Herrera G., Delgado, J., Peña, F. (2009). Subsistencia del Terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, vol.1, pp. 173.

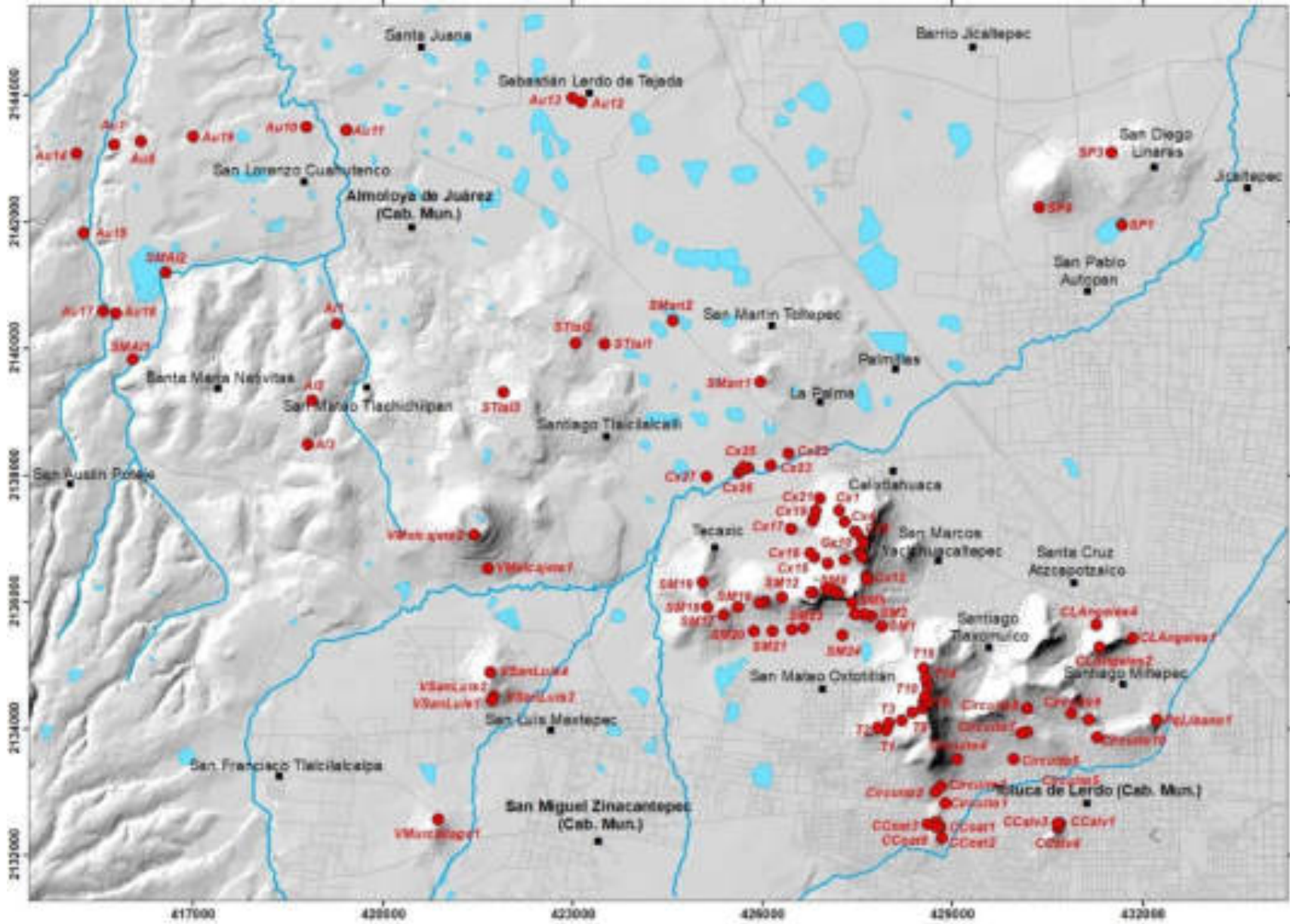
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2011). Manual de gestión del riesgo de desastre para comunicadores sociales. Perú.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (1994). Cartografía geológica.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2019). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?, *Especial sismos*. UNAM. México. En sitio: <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico>

ANEXOS

Anexo 2. Mapa de ubicación de registros recolectados en campo.



Simbología

Elementos Topográficos

- Puntos de muestreo
- Localidades
- Ríos
- Cuerpos de agua

Autor: Marco Antonio López Montoya
Asesor: Dr. Edgar Ángeles Moreno



Proyección: Universal Transversal de Mercator
Datum: WGS-1984
Sistema de Coordenadas: WGS84, UTM Zona 14N
Fuentes: IFOMEGEM, INEGI, CONABIO.

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas			WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.			Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
Cx1	427203	2137447	2740	Toluca	Dacita		Porfídica							
Cx2	427287	2137263	2781	Toluca	Dacita		Porfídica							
Cx3	427462	2137119	2856	Toluca	Dacita	Cuarzo, hornblendas, anfíboles, piroxenos, plagioclasas	Porfídica-Afanítica							
Cx4	427480	2137095	2871	Toluca	Dacita	Cuarzo, epidota, anfíboles, piroxenos	Glomera porfídica					1: 10°/62°SE		
Cx5	427577	2136977	2919	Toluca	Riodacita	Cuarzo, esferulitas			Mixin, Replenich, Autobrechamiento			1: 20°/30°SE		
Cx6	427585	2136934	2922	Toluca					Vetillas de calcedonia			1: 18°/40°NW		
Cx7	427523	2136799	2913	Toluca					Autobrechamiento					
Cx8	427554	2136732	2894	Toluca	Dacita-Andesita		Porfídica				1: 130°/82°SW 2: 124°/85°SW 3: 142°/74°SW			
Cx9	427567	2136713	2881	Toluca	Dacita y Riodacita						1: 30°/40°NW 2: 330°/77°NE 3: 350°/80°NE 4: 0°/78°E			
Cx10	427640	2136413	2808	Toluca				Clastos mal clasificados	Brecha volc., soldada por lava, colapso de domo			1: 30°/27°NW		
Cx11	427640	2136383	2794	Toluca	Limolitas				Hidrotermalismo en falla		1: 15°/82°SE			
Cx12	427646	2136357	2773	Toluca	Andesita				Fract. Sist. Separadas., presencia de vulcanosedimento	1: 60°/74°SE 2: 65°/68°SE 3: 70°/68°SE				
Cx13	427294	2136673	2766	Toluca	Dacita y Andesita			Bloques de 5m angulosos	Depósitos de Talud, Derrames					
Cx14	427029	2136614	2790	Toluca				Conglomerados de abanicó aluvial, sed. Fluviales	Suelos de 25 a 30m de altura					
Cx15	426804	2136708	2688	Toluca				Paleosuelos	Fracturas de suelos columnares					
Cx16	426744	2136775	2680	Toluca				Paleosuelos	Espesor de 2.5m con raíces					
Cx17	426445	2137155	2678	Toluca	Dacita							1: 0°/10°E		
Cx18	426787	2137278	2695	Toluca				Paleosuelos, vulcanosedimento de origen lacustre	Sedimentos con desarrollo de raíces, presencia de roca volc,					
Cx19	426805	2137345	2699	Toluca	Dacita			Paleosuelos y capa lacustre	Derrames de lava bajo paleosuelos					
Cx20	426835	2137449	2700	Toluca	Dacita			Paleosuelos de 4m de espesor	Derrames de lava bajo paleosuelos					
Cx21	426904	2137637	2636	Toluca	Dacita			Paleosuelos y suelos recientes	Derrames de lava bajo paleosuelos					
Cx22	426399	2138350	2641	Toluca				Suelo, arenas gruesas, arenas finas, conglomerados, clastos bien redondeados	Conglomerados con clastos de andesitas, laminación cruzada					

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas			WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.			Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
Cx23	426128	2138154	2643	Toluca				Suelo, gravas, arena gravas antiguas	Terrazas fluviales escalonadas					
Cx24	425773	2138124	2646	Toluca				Suelo, gravas, arenas, gravas, flujo piroclástico o lahar	Río Tejalpa, acuífero local superficial					
Cx25	425690	2138137	2652	Toluca				Depósitos sed, de gravas fluviales						
Cx26A	425653	2138083	2651	Toluca				Lahar	Fractura corta lahar	1: 315°/90°				
Cx26B	425613	2138042	2649	Toluca				Suelo, flujo piroclástico, paleosuelos, gravas y arenas, paleosuelos, lahar	de 10 a 12m					
Cx27	425105	2137977	2658	Toluca				Gravas y arenas fluviales	Antiguas minas					
SM-01	427877	2135621	2741	Toluca	Dacita	Anfíboles, plagioclasas	Porfídica		Derrames de dacita					
SM-02	427714	2135781	2778	Toluca	Dacita				Afloramiento de flujo laminar dacítico, betillas, zonas de fracturas SE-NW	1: 35°/73°SE 2: 210°/76°NW 3: 40°/77°SE 4: 250°/83°NW 5: 82°/76°SE				
SM-03	427594	2135805	2794	Toluca	Andesita vesicular		Porfídica	Limolitas de intemperismo	Cambio de morfología en el cerro, Autobrechas volc.					
SM-04	427452	2135805	2786	Toluca	Andesita		Porfídica	Clastos con estructura de rompecabezas	Bandeamientos de flujo con brechas, oxidación de clastos en reacción con temperatura			1: 253°/76°NW 2: 248°/78°NW 3: 220°/75°NW		
SM-05	427402	2135984	2810	Toluca	Andesita	Fenocristales, magnetitas	Porfídica			1: 210°/77°NW 2: 28°/76°NW 3: 32°/67°NW				
SM-06	427195	2136138	2833	Toluca	Andesita				Derrames	1: 20°/84°SE 2: 350°/84°NE 3: 340°/90°				
SM-07	427111	2136170	2847	Toluca	Andesitas				Contacto de derrames de lava flujos más laminares			1: 170°/27NW		
SM-08	427002	2136213	2863	Toluca	Andesita Basáltica				Intercalación de derrames de lava andesítica con brechas volc.			1: 173°/34°W		
SM-09	426799	2136152	2857	Toluca	Andesita	Plagioclasas		Limolitas de intemperismo,	Flujos de autobrechas volc., hidróxidos de hierro por intemperismo					
SM-10	426758	2136151	2850	Toluca	Andesitas							1: 95°/89°SW 2: 100°/85°SW 3: 110°/79°SW 4: 105°/83°SW 5: 268°/70°N		
SM-11	426758	2136151	2850	Toluca	Andesitas							1: 185°/43° W 2: 170°/34°SW		

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
SM-12	426303	2136070	2780	Toluca	Andesita a latita o trakita	Feldespato alcalino Feldespato potásico		Suelo, cenizas, paleosuelos, derrames de andesita					
SM-13	426034	2136012	2799	Toluca	Andesitas				Morfología de escarpe, no se ve falla	1: 135°/85°NE		1: 310°/76°NE	
SM-14	426008	2135979	2786	Toluca	Andesita				Escarpes pequeños desarrollados después de los derrames y brechas volc.	1: 133°/60SW			
SM-15	425944	2135988	2776	Toluca	Andesita				Derrames con líneas de flujo onduladas, intercalados con brechas volc., los derrames son cortados por fracturas estructurales	1: 320°/82°NE 2: 322°/86°SW 3: 330°/88°SW			
SM-16	425605	2135921	2751	Toluca						A1: 310°/62°NE A2: 327°/76°NE A3: 304°/83°NE B1: 305°/80NE B2: 297°/90°		1: 145°/245°SW	
SM-17	425377	2135789	2800	Toluca	Andesita-Pumisitica	Biotita, plagioclasas	Porfídica						
SM-18	425120	2135916	2811	Toluca	Andesítica	Anfíboles, plagioclasas, Piroxenos	Porfídica		Líneas de flujo				
SM-19	425046	2136315	2767	Toluca	Latita o trakita	Cuarzo, biotita, plagioclasas, olivino			Unidades de derrame de lava Down, unidad de brecha volc., derrames con sistemas de fracturamiento subverticales				
SM-20	425855	2135537	2717	Toluca	Andesita	Ferromagne-sianos, feldespatos potásicos		Suelos, suelos (limo arenoso, rocas volc.)	Bioturbación (presencia de vegetación)				
SM-21	426144	2135535	2711	Toluca				Suelo (limo-arcilloso), paleosuelo, deposito piroclástico (bloques de pómez y ceniza)					
SM-22	426455	2135568	2716	Toluca									
SM-23	426641	2135590	2722	Toluca				Suelo, paleosuelo, gravas fluviales (andesitas)					
SM-24	427259	2135477		Toluca	Andesita				Flujo piroclástico de bloques con flujos de andesita				
T1	427955	2133978	2808	Toluca	Dacita	Cuarzo, plagioclasas, olivinos	Porfídica		Derrame tipo Doom, lóbulo hasta donde está la mina			1: 147°/15°SW	

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas			WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural				
	Latitud	Longitud	Elev.			Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas	
T2	427817	2134012	2806	Toluca	Dacita	Cuarzo, plagioclasas, olivinos	Porfídica				1: 35°/78°SE 2: 60°/90° 3: 65°/82°NW				
T3	427987	2134090	2833	Toluca	Dacita	Anfíbol, epidota-clorita, cuarzo, hornblendas, plagioclasas	Porfídica								
T4	428191	2134128	2870	Toluca	Dacita		Porfídica		Extracción de materia pétreo, con planos de flujo ondulados				1: 85°/23°SW		
T5	218285	2134161	2900	Toluca	Dacita		Porfídica		Planos lávicos, movimiento del terreno	A1: 164°/90° A2: 205°/82°NW B1: 95°/65°SW B2: 96°/70°SW					
T6	428365	2134255	2921	Toluca	Dacita		Porfídica		Escarpes en zona de fracturas en derrames de lava	1: 195°/90° 2: 195°/85°NW 3: 115°/85°SW					
T7	428521	2134316	3014	Toluca	Dacita	Cuarzo, hornblendas, plagioclasas	Porfídica		Afloramiento de flujo						
T8	428540	2134429	3026	Toluca	Dacita				Dacita con plano de flujo	1: 157°/64°SW 2: 138°/47°SW 3: 260°/63°NW			1: 40°/52°SE		
T9	428589	2134454	3034	Toluca	Dacita		Porfídica						1: 123°/32°SW		
T10	428618	2134425	3031	Toluca	Dacita				Zona de fracturas	1: NS/80°NW					
T11	428566	2134509	3037	Toluca	Dacita				Zona de fractura en derrames	1: 200°/80°NW 2: 220°/85°NW			1: 47°/14°SE		
T12	428596	2134675	3023	Toluca	Dacita				Flujos de dacita con Sist. De fracturas	1SA: 130°/72°SW 2SA: 135°/75°SW 1SB: 215°/62°NW 2SB: 220°/62°NW 1SC: 132°/74°SW			1: 30°/44°SE		
T13	428583	2134761	2989	Toluca	Dacita				Líneas de flujo con fracturas, posible falla lateral	1: 345°/84°NE 2: 340°/90° 3: 346°/85°NE 4: 346°/90°			1: 140°/75°NE		
T14	428576	2134800	2976	Toluca					Fracturas pasivo ambiental	1: 146°/82°SW 2: 150°/78°SW					
T15	428537	2134954	2944	Toluca					Flujos con fracturas	1: 335°/84°NE 2: 330°/67°NE 3: 336°/80°NE			1: 55°/80°SE		
SP1	431670	2141960	2601	Toluca	Basaltos				Brecha volc., flujos de basalto	A1: N/S 80°W B1: 150°/70°SW C3: 315°/42°N					
SP2	431670	2141960	2601	Toluca	Basaltos				Suelo, pómez, ceniza, Br. Volc., derrames de basaltos	A1: 330°/82°NE A2: 325°/75°NE rellenas de arcilla B1: 78°/74°SE B2: 20°/73°SE C1: 290°/87°NE					

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural				
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas	
SP3	431507	2143099	2624	Toluca	Basaltos					Fracturas de tensión rellenas de lomo-arcilloso	1: 90°/83°S 2: 285°/85°N 3: 310°/90° 4: 235°/73°NW 5: 65°/80°SE 6: 10°/90° 7: N/S/86°NE 8: 1 4°/88°W 9: 204°/90° 10: 217°/88°NW 11: 215°/80°NW 12: 165°/76°SW 13: 340°/84°NE 14: 347°/74°SW 15: 47°/89°SE 16: 203°/87°SE 17: 143°/80°NE 18: 46°/70°SE 19: 230°/88°NW 20: 300°/87°NE 21: 320°/84°NE			
SP4	430367	2142237	2641	Toluca						Mina cono piroclástico, presencia de bombas volc.				
SMart1	425956	2139479	2665	Toluca	Cono piroclástico.					Depósitos piroclásticos con bombas	1: 240°/80°sw			
SMart2	424575	2140445	2643	Toluca	Cono Piroclástico.			Gravas con clastos subredondeados y sub angulosos		Depósitos piroclásticos con bombas				
ST1	423499	2140073	2646	Almoloya de Juárez						Pozo de agua potable				
ST2	423042	2140091	2676	Almoloya de Juárez	Flujo de lava			Suelo, arenas de abanicos aluviales, cenizas antiguas, flujo lávico						
ST3	421896	2139314	2701	Almoloya de Juárez	Lavas			Abanicos de limos y arenas		Abanicos de limos y arenas sobre derrames de lava				
AL1	419261	2140388	2611	Almoloya de Juárez				Suelo, flujo piroclástico, cenizas, paleosuelos, flujo de Br. Volc.		Cercano a río				
AL2	418875	2139187	2705	Almoloya de Juárez				Depósitos de ceniza laminados y lapilli Volc.						
AL3	418812	2138486	2745	Almoloya de Juárez				Depósitos de ceniza laminados y lapilli Volc.						

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
SMAI1	416031	2139834	2626	Almoloya de Juárez	Andesita			Suelo, arenas, gravas, Roca volc., flujos de andesita	Cercano a río	A1: 330°/68°NE A2: 320°/67°NE B1: 40°/72°NE B2: 335°/36°NE			
SMAI2	416555	2141209	2631	Almoloya de Juárez				Suelo, paleosuelos, gravas, Piroclastos					
AU1	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez	Gravas andesitas			Suelo, grava, arcilla limosa, arenas con lentes de grava	Clastos con derrame de lava andesítica , espesor de 15 m aprox.				
AU2	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez					Fractura rellena de materia orgánica y arcilla negra	1: 350°/88°NE			
AU3	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez				Arcillas limosas					
AU4	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez				Gravas y arenas					
AU5	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez				Suelo, paleosuelos, fluvial lacustre con lentes de gravas	Fractura cortando secuencias de paleosuelos y lentes de gravas	285°/83°NE			
AU6	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez					Desplazamiento por fallas normales 1.5m muestran un pequeño graven		1: 305°/87°NE 2: 115°/80°SW		
AU7	415741	2143231	2594	Almoloya de Juárez					Fallas normales		1: 120°/86°SW 2: 145°/86°SW		
AU8	416166	2143281	2608	Almoloya de Juárez				Paleosuelos, depósitos de grava					
AU9	416987	2143355	2604	Almoloya de Juárez				Suelo, paleosuelos, suelos suaves, suelos densos	unidades con 4m de espesor				
AU10	418785	2143502	2585	Almoloya de Juárez	Andesita			Depósitos piroclásticos, laminación, lahar, andesitas	Gravas con estratificación cruzada, gravas con arenas gruesas intercaladas, hidrotermalismo, Falla intraformacional				
AU11	419421	2143461	2587	Almoloya de Juárez				Gravas, limo-arenoso o limo-arcilloso, paleosuelo1, paleosuelo2, limos arenosos con gravas dispersas	con espesor de 3.5m aprox.				
AU12	423125	2143901	2614	Toluca	Flujos piroclástico de andesita	Cuarzo		Suelos, paleosuelos fluvio lacustres, depósitos piroclásticos mal clasificados					

Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
AU13	422980	2143959	2614	Toluca				Suelo, gravas fluviales, arenas-gravas, bloques de arena gruesa mal clasificada	clastos subangulosos, bloques de arena gruesa (Lahar), bloques en estructuración masiva				
AU14	415148	2143093	2606	Almoloya de Juárez				Suelo, paleosuelos, gravas y arenas	de 10 a 15 m				
AU15	415265	2141830	2597	Almoloya de Juárez				Suelo, grava, arcilla interestratificada, flujo piroclástico (ceniza y pómez)	Depósitos fluvio lacustres, depósitos piroclásticos	1: 348°/77°NE			
AU16	415265	2141830	2597	Almoloya de Juárez					Fractura con posible falla	1: 290°/83°NE			
AU17	415573	2140592	2614	Almoloya de Juárez				Suelos, Bloques de gravas, gravas gruesas con arenas, gravas, pómez y ceniza, gravas y arenas		1: 50°/90			
AU18	415772	2140556	2610	Almoloya de Juárez				Suelo, cenizas, surge flujo piroclástico (pómez y ceniza), surge basal, arenas-gravas, flujo piroclástico	flujo piroclástico (laminación muy delgada, indica superficie quemada), flujos piroclásticos arrastran secuencias sedimentarias,				
CCoat1	428831	2132273	2685	Toluca	Andesita				Brecha de falla	1: 290°/79°NE 2: 80°/71°NE 3: 124°/77°NE			
CCoat2	428726	2132448	2752	Toluca	Andesita			Clastos de 1m a 1cm , mal clasificados, subangulosos	Flujo andesítico, brecha volcánica compuesta de andesitas	1: E-W			
CCoat3	428601	2132495	2736	Toluca	Andesita					1: 59°/90° 2: 65°/90°		1: 36°/8°SE	
CCoat4	428742	2132530	2739	Toluca	Andesita					1: 25°/47°SW		1: 64°/17°SW	
CCoat5	428805	2132456	2725	Toluca	Andesita				Escarpes 1: 70°/81°NE Escarpes 2: 60°/84°NE				
CCoat6	428887	2132816	2691	Toluca	Andesita				Brecha volcánica (clastos pobremente clasificados de 50cm a 0.5cm)	1: 24°/56°SE			
CCalv1	430664	2132509	2664	Toluca	Andesita			Bloques de 1m a 5cm mal clasificados	Brecha volcánica con intrusión de limo-arcilla	1: 45°/78°NE			
CCalv2	430699	2132502	2695	Toluca	Andesita				Brecha con limo-arcilla, fractura rellena de limo-arcilla y clastos de andesita	1: 43°/80°NW			
CCalv3	430686	2132462	2699	Toluca	Andesita				Escarpe 1: 80°/90°	1: 11°/72°NE 2: 20°/83°SW		1: 74°/29°SE	

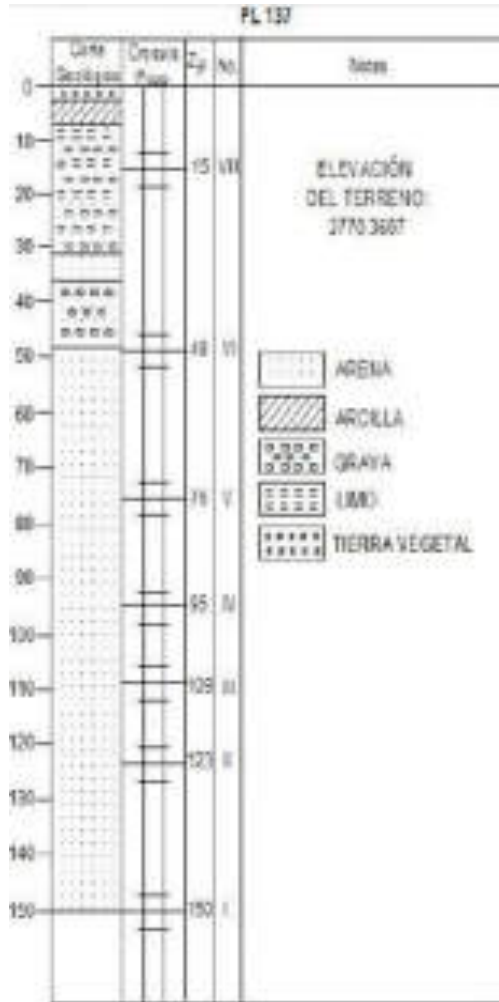
Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
CCalv4	430661	2132423	2714	Toluca	Andesita			Clastos mal clasificados	Brecha volcánica entre derrames andesíticos en el trazo de fractura	1: 33°/90°		1: 74°/25°SW	
Circuito 1	428723	2133002	2703	Toluca					Derrames de andesita-dacita, estructura de diaclasas	1: 56°/44°SW 2: 346°/87°SE 3: 10°/79°SE 4: 1°/65°SE 5: 11°/72°SE		1: 350°/63°NE 2: 62°/54°SE 3: 18°/76°SE 4: 338°/35°NE 5: 67°/50°SE	
Circuito 2	428822	2133094	2720	Toluca				Clasto de brecha volcánica mal clasificados con intercalaciones de ceniza	Termina flujo de andesita-dacita, inicia brecha volcánica de 30m de espesor				
Circuito 3	429077	2133518	2730	Toluca				Clastos medianamente clasificados de 5cm a 40 cm	Flujos piroclásticos con intercalaciones de ceniza				
Circuito 4	429966	2133518	2736	Toluca	Andesitas , dacitas				Diaclasas, Estratificación de diaclasas, brecha volcánica y flujo piroclástico	1: 356°/81°SE 2: 7°/73°NE			1: 74°/30°SE
Circuito 5	430086	2133925	2731	Toluca	Andesitas dacitas				Brecha volcánica con clastos mal clasificados			1: 352°/11°NE	
Circuito 6	430181	2133947	2745	Toluca	Andesitas dacitas			Clastos de brecha de 0.5cm a 40cm	Brecha volcánica con clastos mal clasificados bajo derrames andesíticos y derrames con brechas volcánicas a sus lados	1: 338°/78°NE 2: 11°/81°NW		1: 285°/32°NE 2: 321°/24°NE	
Circuito 7	430175	2134320	2730	Toluca	Andesitas dacitas				Flujos piroclásticos soldados por ceniza, continua derrame con presencia de fractura con hidrotermalismo, en el fin de tramo brecha de falla	1: 319°/90° 2: Br de falla: 335°/80°NE		1: 287°/13°NE	
Circuito 8	430877	2134241	2714	Toluca	Andesitas - dacitas				Diaclasas, continua derrame andesítico, posterior al derrame se sobrepone Brecha volcánica				1: 34°/19°SE 2: 17°/10°SE 3: 23°/32°NW
Circuito 9	431153	2134138	2704	Toluca	Andesitas - dacitas				Derrames de andesita-dacita, estructura de diaclasas				1: 70°/24°SW
Circuito 10	431276	2133866	2685	Toluca	Andesitas - dacitas				Derrames de andesita-dacita, estructura de diaclasas				1: 318°/2°SW
PqLibano1	432226	2134141	2665	Toluca	Andesitas - dacitas			Fractura rellena de material sedimentario de composición andesítica	Separación de fractura rellena de 30cm	1: 84°/81°NW 2: 90°/82°N 3: 328°/90°NE 4: 42°/81°NW		1: 348°/32°NE 2: 319°/90°	1: 301°/33°NE 2: 85°/27°SE 3: NS/72°72°W

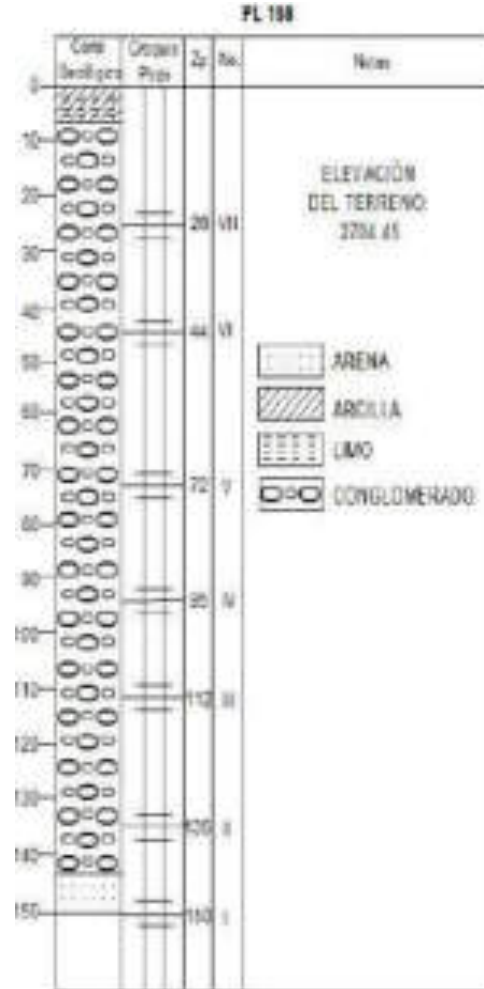
Anexo 3. Tabla de registros recolectados en campo.

Clv de punto	Coordenadas		WGS_1984 UTM	Ubicación	Petrología					Geología Estructural			
	Latitud	Longitud	Elev.		Tipo de roca	Minerales	Textura	Líticos y/o clastos	Observaciones	Fractura	Falla	Lineamiento de flujo o derrames	Diaclasas
CLAngeles 1	431839	2135423	2661	Toluca	Andesitas - dacitas				Múltiples escarpes en derrames de andesita, brecha volcánica a través de fractura con separación de 10cm a 20cm	1: 244°/87°SE		1: 57°/89°SE 2: 60°/12°SE	
CLAngeles 2	431436	213518	2773	Toluca	Andesitas - dacitas				Brecha volcánica que cubre parcialmente a derrames andesíticos				
CLAngeles 3	431314	2135287	2769	Toluca	Andesitas - dacitas				Derrames de andesita			1: 217°/38°SE	
CLAngeles 4	431275	2135646	2667	Toluca	Andesitas - dacitas				Derrames de andesita			1: 27°/24°SE	
VSanLuis1	421714	2134444	2777	Zinacantepec	Basaltos-andesita				Derrames con estructura masiva de color rosa, fracturadas por acción de enfriamiento	1: 245°/90°		1: 146°/ 20°SW	
VSanLuis2	421747	2134510	2795	Zinacantepec	Basaltos-andesita			Clastos de brechas volcánicas con tamaño de 0.5cm a 40cm	Derrames andesíticos intercalados con brechas volcánicas con presencia de matriz rosa y café claro, derrames basálticos				
VSanLuis3	421695	2134890	2818	Zinacantepec	Basaltos-andesita				Estratificación de andesitas intemperizadas con estructura de rompecabezas, se sobreponen cenizas con clastos subangulosos de andesita, en superficie suelos de reciente formación				
VSanLuis4	421636	213509	2733	Zinacantepec	Basaltos-andesita				Bandeamientos de flujos piroclásticos	1: 252°/85°NW		1: 271°/24°SW	
VMolcajete1	421646	2136537	2739	Almoloya de Juárez	Andesita-basalto			De abajo a arriba derrames basálticos, Flujos piroclásticos, cenizas y suelos, derrames andesíticos, flujos piroclásticos	Bandeamientos de flujos piroclásticos			1: 231°/18°NW	
VMolcajete2	421435	2137059	2927	Almoloya de Juárez	Andesita-basalto			Flujos piroclásticos con clastos de 0.5cm a 1m	Flujos piroclásticos				
VMurcielago1	420862	2132572	2794	Zinacantepec	Piroclastos basálticos			Presencia de bombas, suelos recientes de 6 metros de espesor	compuesto de depósitos piroclásticos cubiertos de suelos de reciente formación			1: 349°/41°NE 2: 286°/17°SW	

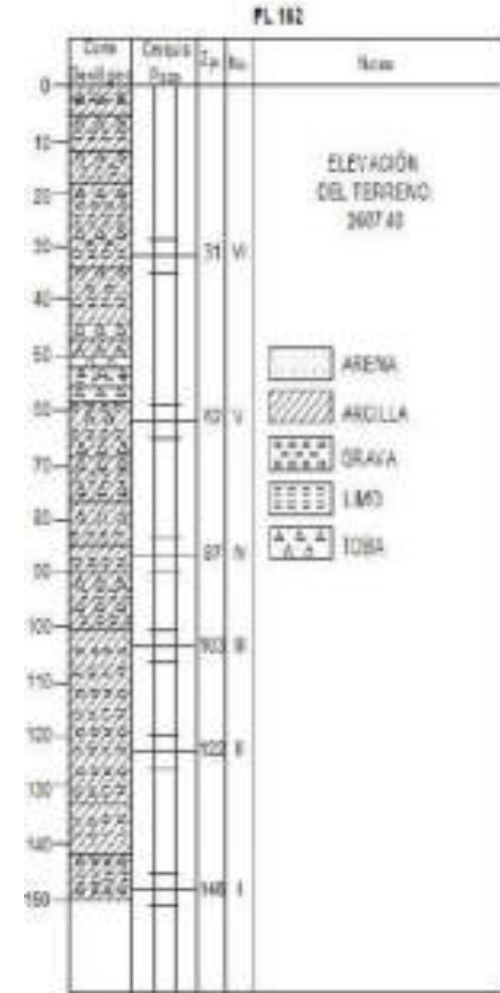
Anexo 4. Columna estratigráfica, pozo PL-137.



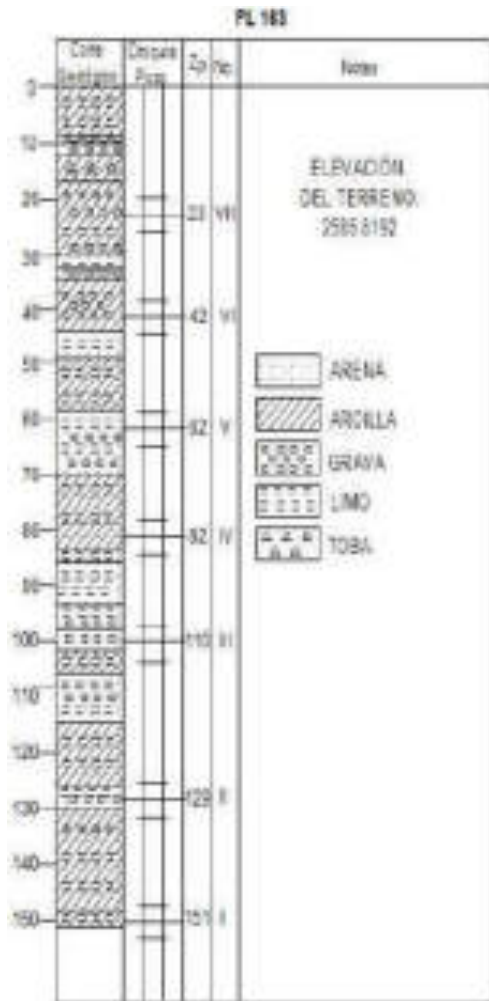
Anexo 5. Columna estratigráfica, pozo PL-158.



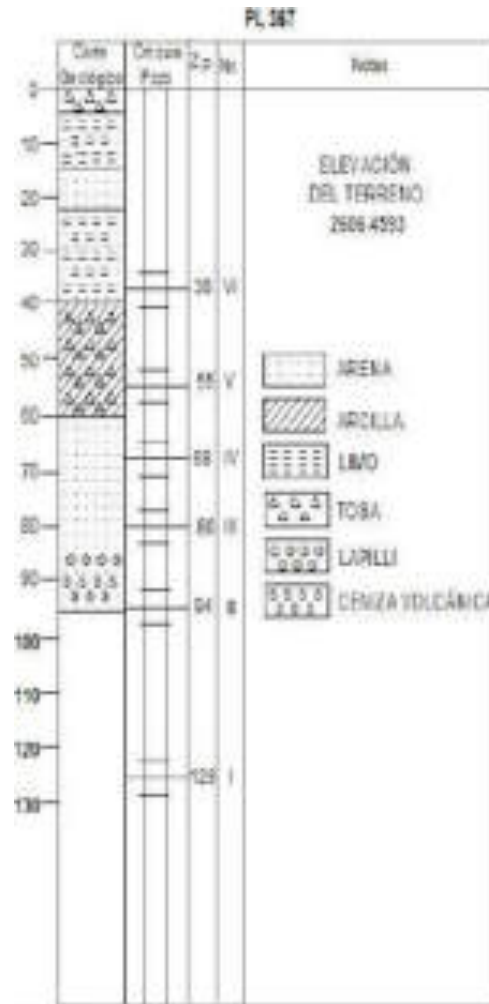
Anexo 6. Columna estratigráfica, pozo PL-162.



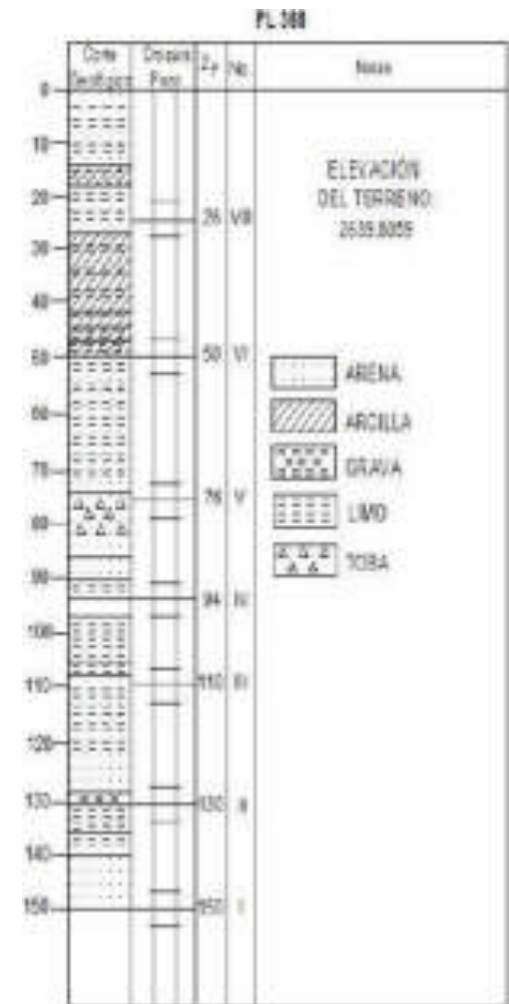
Anexo 7. Columna estratigráfica, pozo PL-163.

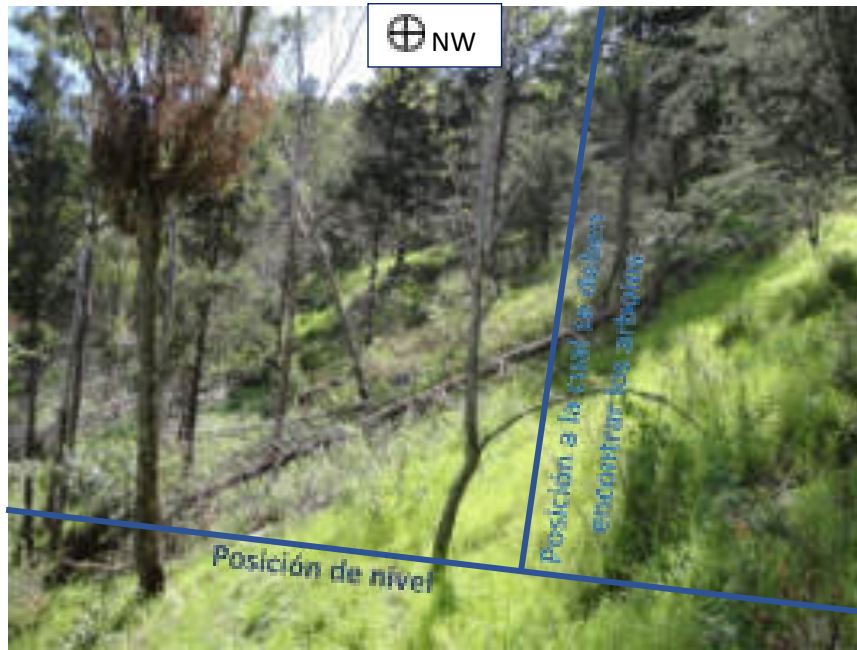


Anexo 8. Columna estratigráfica, pozo PL-367.



Anexo 9. Columna estratigráfica, pozo PL-368.





Anexo 10. Deslizamientos en los flancos SW del Cerro La Teresona.