



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE CIENCIAS DE LA  
TIERRA

**CONTRIBUCIÓN GEOLÓGICA-GEOFÍSICA PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO  
UBICADO AL PONIENTE DE MORELIA, MICHOACÁN.**

TESIS:

Para obtener el grado de:

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Presenta:

Geóloga: Yoloxochitl García Artellano.

Director de tesis:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera.

Morelia, Michoacán febrero, 2019.





## Agradecimientos

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para llevar a cabo este proyecto de tesis por medio del programa de becas nacionales.

Al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) por permitirme continuar aprendiendo y a todos los profesores que contribuyeron a ese conocimiento.

A mi asesor el doctor Alejandro Ávila por su apoyo, enseñanza continua, sus correcciones y su disposición a la mejora de este trabajo, pero sobre todo por su amabilidad y compromiso con el trabajo. Al doctor Víctor Hugo Garduño por sus comentarios hacia mi trabajo, su enseñanza permanente y su disposición para enriquecer el trabajo.

A la doctora Isabel Israde por su disponibilidad al enriquecimiento de este trabajo, la información que me proporciono, los buenos comentarios que tuvo siempre y la sonrisa con la que siempre apoyo mi trabajo.

Al doctor Ángel Figueroa que siempre tuvo la disposición para revisar mi trabajo y brindarme el apoyo para resolver mis dudas.

Al doctor Gerardo Cifuentes de la UNAM por su apoyo y comentarios en los perfiles geofísicos.

Al doctor Luis por ser parte de mi comité y ayudarme con las correcciones

A la doctora Gaby Gómez por sus correcciones y amabilidad con el trabajo.

Al doctor José Pérez por ser parte de este comité y sus observaciones con el trabajo.

A la doctora Ruth por la amabilidad que siempre tuvo conmigo y la disponibilidad para avanzar con los trámites.

A Moni que siempre me ayudo a resolver las dudas con los trámites, los reportes, gracias Moni por tu amabilidad y por siempre estar de buenas para ayudarnos.

A mi compañero Agustín Estrada por acompañarme a campo, sus comentarios y enseñanza.

A Alberto Lara por tener la disposición de acompañarme a las salidas de campo y cuidarnos mutuamente.

Para el taller de laminado que encabeza el doctor Felipe quien me permitió realizar mis láminas delgadas. A los integrantes del laboratorio de petrografía de la UNAM Silvestre Cardona y Gaby Reyes por permitirme analizar mis láminas delgadas y ayudarme a resolver dudas.

A Silvestre Cardona por su amabilidad y disposición sobre las preguntas continuas que tuve sobre su área de estudio.

A Agustín Mastache por su apoyo en la planeación de los levantamientos geofísicos su disposición, ayuda durante el procesamiento y explicaciones continuas sobre el trabajo geofísico.

A los integrantes del Cemie-Geo Agustín Mastache y Dulce, Abby, Agustín Estrada, Alberto Lara Willy, al doctor Alejandro así como a todos los compañeros de ingeniería ambiental e ingeniería civil que apoyaron en los levantamientos geofísicos.

A mi compañero Abram por su enseñanza con el procesamiento de datos geofísicos.

Al ingeniero Andrés Tosca por compartir su información geofísica y su tiempo para darme los comentarios sobre la geofísica.

A Gerardo Bermejo por sus consejos con el trabajo de la geología estructural.

Finalmente pero no menos importante a todas las personas que tuve la dicha de conocer durante mi estancia en la maestría.

## Dedicatoria

Agradecer a la gran energía de este universo que permite seguir creando, aprendiendo y caminando por este sendero.

A mi familia:

A mis padres Catalina Artellano y Pedro Garcia, las personas que siempre han creído en mí, todos mis triunfos son para ustedes. Gracias por su apoyo y enseñanza.

A mis hermanos Irving y Christopher por su compañía, sus travesuras y todo su cariño.

A Galileo mi compañero de vida por caminar conmigo, por acompañarme a campo, por sus consejos y ayuda en este trabajo, por darme ánimos en todo momento y sobre todo por creer en mí.

# ÍNDICE

CONTENIDO	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
<b>1.-INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 Justificación.....	5
1.2 Hipótesis.....	6
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos particulares.....	6
1.4 Antecedentes a nivel mundial.....	7
1.5 Antecedentes nacionales.....	8
1.6 Antecedentes de la zona de estudio.....	10
1.7 Antecedentes geofísicos de la zona de estudio.....	14
<b>2.- MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1 Cartografía geológica.....	17
2.1.1 Etapas del levantamiento geológico.....	18
2.1.2 Escala.....	18
2.1.3 Usos de las cartas geológicas.....	19
2.1.4 Información que debe proporcionar el mapa geológico.....	19
2.2 Geología estructural.....	20

2.2.1 Fracturas asociadas a unidades acuíferas.....	20
2.2.2 Morfología de las fracturas.....	20
2.2.2.1 Fracturas abiertas.....	20
2.2.2.2 Fracturas rellenas de mineral.....	21
2.2.2.3 Fracturas deformadas.....	21
2.2.2.4 Fracturas completamente llenas.....	21
2.2.2.5 Conectividad entre fracturas.....	22
2.2.2.6 Porosidad.....	22
2.2.2.7 Permeabilidad.....	23
2.2.2.8 Ventanas circulares de fracturamiento.....	23
2.2.2.9 Parámetros de fracturamiento a considerar.....	23
2.2.2.9.1 Sesgo por orientación.....	24
2.2.2.9.2 Sesgo por truncamiento.....	24
2.2.2.9.3 Sesgo por censuramiento.....	24
2.3 Prospección geofísica.....	25
2.3.1 Tomografía eléctrica.....	25
2.3.2 Clasificación de métodos geofísicos utilizados en hidrogeología.....	26
2.3.3 Usos del método.....	27
2.3.4 Resistividad eléctrica y características eléctricas de las rocas.....	27
2.3.5 Factores que afectan la resistividad.....	28
2.3.6 Ventajas y limitaciones del método.....	29
2.3.6.1 Ventajas.....	29
2.3.6.2 Limitaciones.....	30

2.3.7 Fundamentos teóricos del método.....	30
2.3.8 Profundidad de investigación y función de sensibilidad.....	31
2.3.9 Configuraciones electródicas lineales.....	32
2.3.9.1 Configuración Wenner.....	32
2.3.9.2 Configuración Schlumberger.....	33
2.3.9.3 Configuración Dipolo- Dipolo.....	33
2.3.9.4 Configuración Polo- Dipolo.....	34
2.3.10 Equipo.....	34
2.3.11 Procesado de datos de campo.....	35
2.3.11.1 Block inversion method.....	36
2.3.11.2 Smoothness-constrained inversion method.....	36
2.3.12 Interpretación de los resultados.....	36
<b>3.- ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>38</b>
3.1 Macro localización.....	38
3.2 Micro localización y vías de acceso.....	39
3.3 Fisiografía y topografía.....	39
3.4 Geomorfología.....	40
3.5 Hidrografía.....	40
3.6 Clima.....	40
3.7 Geología regional.....	42
3.8 Geología local.....	45
3.8.1 Andesita del Mioceno.....	45
3.8.2 Ignimbrita Atécuaro.....	45

3.8.3 Secuencia fluvio-lacustre.....	46
3.8.4 Secuencia volcánica holocénica del corredor Tarasco o Vulcanismo monogenético..	46
3.9 Dataciones.....	47
3.10 Geología estructural.....	49
3.10.1 Sistema de fallas NE-SO.....	50
3.10.2 Sistema de fallas E-O.....	50
3.10.3 Sistema de fallas NO-SE.....	50
3.10.4 Fallas sísmicas.....	51
3.10.5 fallas ligadas a hundimientos.....	52
3.11 Geohidrología.....	52
<b>4.- METODOLOGÍA.....</b>	<b>56</b>
4.1 Trabajo de gabinete.....	57
4.2 Trabajo de campo.....	57
4.2.1 Cartografía de la zona de estudio.....	57
4.2.2 Mapa geológico en SIG.....	57
4.3 Geología estructural.....	58
4.3.1 Utilización de Stereonet.....	59
4.3.2 Procesamiento de datos de fracturas.....	60
4.4 Levantamiento de perfiles geofísicos.....	60
4.4.1 Procesado de datos de campo.....	62
4.5 Columna litológica.....	63
4.6 Trabajo de laboratorio.....	63
4.6.1 Laminación de muestras.....	63



4.6.2 Petrografía.....	64
<b>5.-RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
5.1 Geología y estratigrafía.....	65
5.1.1 Ignimbrita Atecuaro.....	67
5.1.2 Ignimbrita El Rodeo.....	68
5.1.3 Dacita Itzícuaró.....	69
5.1.4 Secuencia fluvio-lacustre.....	70
5.1.5 Unidad El Águila.....	71
5.1.6 Unidad El Remolino.....	72
5.1.7 Unidad andesítica y conos de escoria Concepción.....	73
5.1.8 Unidad Tetillas.....	75
5.1.9 Lava basáltica el Divisadero.....	77
5.1.10 Conos de escoria Tacícuaró.....	79
5.1.11 Unidad Andesítica Capula.....	80
5.2 Columna tipo del área Morelia-Capula.....	81
5.3 Petrografía.....	83
5.3.1 Ignimbrita El Rodeo.....	83
5.3.2 Dacita Itzícuaró.....	85
5.3.3 Unidad Andesítica y Conos de Escoria Concepción.....	88
5.3.4 Unidad Andesítica Capula.....	90
5.4 Interpretación estructural.....	92
5.4.1 Fallas geológicas.....	92
5.4.2 Ubicación de la toma de datos estructurales.....	94

5.4.3 Resultados estructurales de la Andesita Mil Cumbres.....	95
5.4.4 Porosidad por fisuración de la Andesita Mil Cumbres.....	95
5.4.5 Longitud de fracturas de la Andesita Mil Cumbres.....	96
5.4.6 Frecuencia de las aperturas de fracturas en la Andesita Mil Cumbres.....	96
5.4.7 Resultados estructurales de la Ignimbrita de Atecuaro.....	97
5.4.8 Porosidad por fisuración de la Ignimbrita de Atecuaro.....	98
5.4.9 Longitud de fracturas de la Ignimbrita de Atecuaro.....	98
5.4.10 Frecuencia de las aperturas de fracturas en la Ignimbrita de Atecuaro.....	99
5.5 Interpretación geofísica.....	100
5.5.1 Ubicación de los perfiles geofísicos.....	100
5.5.2 Datos crudos de los perfiles geofísicos.....	102
5.5.3 Interpretación geofísica de los perfiles .....	105
5.5.3.1 Perfil 1 Villas del pedregal.....	105
5.5.3.2 Perfil 2 Capula.....	107
5.5.4 Interpretación geológica de los perfiles.....	110
5.5.4.1 Perfil 1 Villas del pedregal.....	110
5.5.4.2 Perfil 2 Capula.....	114
<b>6.-DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
6.1 Discusión.....	116
6.2 Conclusiones.....	118
6.3 Recomendaciones.....	119
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>
<b>8.- ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.- Esquema de representación de un mapa geológico.....	17
Figura 2.- Ejemplos de la morfología de fracturas.....	21
Figura 3.- Relación de conectividad entre fracturas.....	22
Figura 4.- Clases de sesgo.....	25
Figura 5.- Clasificación de los métodos geofísicos más utilizados en hidrogeología.....	26
Figura 6.- Rangos típicos de resistividades de algunos materiales.....	29
Figura 7.- Fundamento teórico del método TRE.....	31
Figura 8.- Configuración electródica Wenner.....	33
Figura 9.- Configuración electródica Schlumberger.....	33
Figura 10.- Configuración electródica Dipolo-Dipolo.....	34
Figura 11.- Configuración electródica Polo-Dipolo.....	34
Figura 12.- Equipo SuperSting R1 Electrical Resistivity.....	35
Figura 13.- Mapa de la macro localización de la zona de estudio.....	38
Figura 14.- Mapa de la micro localización de la zona de estudio.....	39
Figura 15.- Mapa de la región hidrológica.....	41
Figura 16.- Patrón de fallas normales cuaternarias ubicadas en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana.....	43
Figura 17.- Patrón de fallas normales cuaternarias de la región de Acambay.....	44
Figura 18.- Mapa de Geología local de la zona de estudio.....	47
Figura 19.- Mapa de dataciones cercanas a la zona de estudio.....	49
Figura 20.- Sistemas de fallas regionales con orientación NE-SO y E-O.....	50
Figura 21.- Fallas geológicas de la ciudad de Morelia.....	52
Figura 22.- Organigrama de la metodología del trabajo.....	56
Figura 23.- Trabajo cartográfico.....	58
Figura 24.- Geología estructural.....	59
Figura 25.- Programa Stereonet 32.101.....	59
Figura 26.- Cableado del perfil 1 Villas del Pedregal.....	61
Figura 27.- Perfil geofísico al norte de la localidad de Capula.....	61

Figura 28.- Equipo SuperSting R1.....	62
Figura 29.- Trabajo de laminado.....	64
Figura 30.- Trabajo petrográfico.....	64
Figura 31.- Mapa geológico al poniente de Morelia.....	66
Figura 32.- Afloramientos de la ignimbrita Atecuaro.....	67
Figura 33.- Afloramiento de la Ignimbrita Rodeo.....	68
Figura 34.- Afloramiento de la Dacita Itzicuaró.....	69
Figura 35.- Muestras de mano de la Dacita Itzicuaró.....	70
Figura 36.- Afloramientos de la unidad El Águila.....	71
Figura 37.- Muestras de mano de la unidad el Águila.....	72
Figura 38.-Afloramiento de la unidad El Remolino.....	73
Figura 39.- Afloramiento de la unidad andesítica y conos de escoria concepción ubicado en el fraccionamiento Jardín de la Montaña.....	74
Figura 40.- Afloramiento ubicado al Oeste de la Concepción.....	74
Figura 41.- Afloramiento localizado en la carretera hacia Cuto de la Esperanza.....	75
Figura 42.- Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado en el fraccionamiento Campo Nubes.....	76
Figura 43.- Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado al este de la concepción.....	76
Figura 44.- Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado al norte de Morelia.....	77
Figura 45.- Afloramiento de la unidad Tetillas en el fraccionamiento Hacienda.....	77
Figura 46.- Afloramientos de la Unidad Lava Basáltica el Divisadero.....	78
Figura 47.- Muestras de mano de la unidad basáltica El Divisadero.....	79
Figura 48.- Afloramientos de la Unidad Andesítica Capula.....	80
Figura 49.- Muestras de roca de la Unidad Andesítica Capula.....	81
Figura 50.- Columna tipo del área de estudio.....	82
Figura 51.- Microfotografías de la Unidad Ignimbrita Rodeo.....	84
Figura 52.- Microfotografías de la Unidad Dacita Itzicuaró, muestra 2-Itzicuaró.....	86
Figura 53.- Microfotografías de la Unidad Dacita Itzicuaró, muestra 27 Itzicuaró.....	87
Figura 54.- Microfotografías de la Unidad andesítica y Conos de escoria Concepción muestra 9 Jardín.....	89
Figura 55.- Microfotografías de la Unidad Andesítica Capula. Muestra 14 Capula Norte.....	91

Figura 56.- Mapa de las fallas de la zona de estudio.....	93
Figura 57.- Ubicación de los afloramientos donde se tomaron los datos estructurales.....	94
Figura 58.- Roseta del movimiento de flujo subterráneo en la unidad Andesita Mil Cumbres.....	95
Figura 59.- Grafica de la frecuencia de longitud de fracturas en la Unidad Andesita Mil Cumbres.....	96
Figura 60.- Grafica de la frecuencia de aperturas de fracturas en la Unidad Andesita Mil Cumbres.....	97
Figura 61.- Roseta del movimiento de flujo subterráneo en la unidad Ignimbrita de Atecuaro.....	98
Figura 62.- Grafica de la frecuencia de longitud de fracturas en la Unidad Ignimbrita de Atecuaro.....	99
Figura 63.- Grafica de la frecuencia de apertura de fracturas en la Unidad Ignimbrita de Atecuaro.....	99
Figura 64.- Ubicación de los perfiles geofísicos.....	101
Figura 65.- Datos crudos del perfil 1.....	103
Figura 66.- Datos crudos del perfil 2.....	104
Figura 67.- Sección geofísica procesada del perfil 1 Villas del pedregal.....	106
Figura 68.- Perfil Topográfico de villas del pedregal.....	106
Figura 69.- Sección geofísica procesada del perfil 2 al norte de Capula.....	108
Figura 70.- Perfil Topográfico de Capula.....	108
Figura 71.- Interpretación geofísica del perfil 1 villas del pedregal.....	109
Figura 72.- Interpretación geofísica del perfil 2 Capula.....	109
Figura 73.- Mapa de la ubicación de los pozos.....	111
Figura 74.- Información litológica de los pozos más cercanos al perfil 1.....	112
Figura 75.- Información litológica de los pozos más cercanos al perfil 1 y 2.....	113
Figura 76.- Interpretación geológica del perfil 1 villas del pedregal.....	115
Figura 77.- Interpretación geológica del perfil 2 Capula.....	115

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1.- La escala del mapa geológico y algunas de las aplicaciones más usuales.....	19
Tabla 2.- Fechamientos de la zona de estudio.....	48

## Resumen

La zona poniente de Morelia considerada como la zona de infiltración y recarga de los manantiales que abastecen a una parte importante de la ciudad, en los últimos años ha crecido de manera exponencial, lo que se ha visto reflejado con el aumento de la mancha urbana, principalmente por fraccionamientos de interés social. Aproximadamente un 33% de abastecimiento de agua potable proviene de esta zona, por consiguiente, es necesario contar con estudios que contribuyan a la caracterización del sistema acuífero de la zona para una mejor gestión del agua subterránea. Las contribuciones consistieron en 1) Elaborar una cartografía geológica a escala 1: 20,000 para lo que se determinaron las unidades litológicas y las principales fallas de la zona. 2) Realizar el análisis estructural de las formaciones acuíferas asumiendo que la recarga de los acuíferos es por medio del fracturamiento de las rocas; analizando estos datos se puede conocer la porosidad por fisuración de los acuíferos y el comportamiento del flujo subterráneo. 3) Efectuar un estudio geofísico mediante el método de tomografía eléctrica el cual es un método que permite realizar muchas mediciones en corto tiempo; es una herramienta que dependiendo del arreglo electródico puede alcanzar grandes profundidades y ayudar a interpretar las características geológicas de la zona así como ayudar a ubicar el nivel freático. A partir de estos estudios se definieron once unidades litológicas, se obtuvo una porosidad por fisuración de 0.82% con dirección del flujo subterráneo NE-SO para la Andesita Mil Cumbres y, una permeabilidad de 5.68% con dirección del flujo subterráneo NE-SO y E-O para la Ignimbrita de Atécuaro, ambas direcciones de flujo corresponden a las direcciones del fallamiento regional. Finalmente, los resultados geofísicos hacen inferir la posible existencia de la continuación de la falla la Colina hacia la parte sureste del fraccionamiento Villas del Pedregal, así como la identificación de un nivel de saturación de agua en los basaltos de esa zona a los 90 m de profundidad; mientras que en la zona norte de Capula dicho nivel de saturación se infiere en los 50 m de profundidad.

**Palabras clave:** Cartografía geológica, unidades litológicas, acuífero, porosidad por fisuración, tomografía eléctrica.

## Abstract

The western zone of Morelia is considered as the zone of infiltration and recharge of the springs that supply an important part of the city, in recent years it has grown exponentially, which has been reflected in the increase in the urban sprawl, mainly of social interest residential area. Approximately 33% of drinking water supply comes from this area, therefore, it is necessary to have studies that contribute to the characterization of the aquifer system of the area for a better management of groundwater. The contributions consisted in 1) Elaborate a geological cartography at 1: 20,000 scale for which the lithological units and the main faults of the zone were determined. 2) Perform the structural analysis of the aquifer formations assuming that the recharge of the aquifers is through the fracturing of the rocks; by analyzing these data one can know the porosity of the aquifers and the behavior of the underground flow. 3) Carry out a geophysical study using the electrical tomography method which is a method that allows many measurements in a short time; It is a tool that depending on the electrode arrangement can reach great depths and help to interpret the geological characteristics of the area as well as helping to locate the water table. From studies eleven lithological units were defined, a porosity of 0.82% was obtained with direction of the underground flow NE-SW for the Andesita Mil Cumbres and 5.68% with direction of the underground flow NE-SW and E-O for the Ignimbrita Atécuaro, both flow directions correspond to the directions of the regional fault. Finally, the geophysical results infer the possible existence of the continuation of the Colina fault towards the southeastern part of the Villas del Pedregal residential area, as well as the identification of a level of water saturation in the basalts of that area at 90 m depth; while in the northern area of Capula said level of saturation is inferred in the 50 m depth.

**Keywords:** Geological cartography, Lithological units, Aquifer, Porosity, Electrical tomography.



## 1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso imprescindible, especialmente donde el agua superficial no puede satisfacer la demanda de la agricultura, industria y consumo humano. De los 37 millones de km<sup>3</sup> de agua dulce estimados en la Tierra, alrededor del 22% existe como agua subterránea, lo cual constituye aproximadamente el 97% del agua dulce en estado líquido disponible para el uso humano. México dispone aproximadamente del 0.01% del total de agua dulce disponible a nivel mundial (CONAGUA, 2016). El agua subterránea cumple una función ambiental en la naturaleza por su contribución a los caudales de ríos, manantiales, lagos, humedales y estuarios; conocer los volúmenes de agua existentes en una región y su funcionamiento hidrogeológico contribuye a una mejor gestión del recurso.

Los recursos de agua dulce de la Tierra se renuevan a través de un ciclo continuo de evaporación, precipitación, infiltración y escorrentía conocido como ciclo hidrológico, que determina su distribución y disponibilidad a través del tiempo y el espacio (SEMARNAT, 2015). Estos recursos se consideran renovables excepto algunas aguas subterráneas, ya que el período necesario para que el acuífero se vuelva a llenar es muy largo, entre cientos y miles de años, en comparación con el marco temporal de la actividad humana (Foster *et al.*, 2006). En adición al agua dulce que es renovada por la lluvia, el país cuenta con reservas de agua almacenadas principalmente en acuíferos, pero también en lagos naturales y artificiales; sin embargo esta agua no se considera en los cálculos de disponibilidad media ya que no es renovable. México recibe anualmente alrededor de 1,449,471 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos) de agua en forma de precipitación, de los cuales el 67% cae entre junio y septiembre, sobre todo en la región sur-sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco); de este total 73% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 21% escurre por los ríos o arroyos y 6% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2014).

En función de la relación extracción/recarga se define si los acuíferos se declaran como sobreexplotados o dejan de serlo, (SEMARNAT, 2015) México se ha dividido en 653 acuíferos de los cuales entre 100 y 106 están sobreexplotados, de ellos se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos (SEMARNAT, 2014). El agua que se emplea para los diferentes usos consuntivos (32,906 Mm<sup>3</sup> por año al 2014), alrededor del 39% procede de agua subterránea, (CONAGUA, 2015). La mayor cantidad de agua es usada con fines agropecuarios al año 2013 el 33.6% era de origen subterráneo, mientras que para abastecimiento público alrededor del 60.4% provenía de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2014). El estado de Michoacán tiene un volumen disponible de 5,257 Mm<sup>3</sup> de agua, de los que el 89.4% está concesionada a usos agropecuarios, 0.92% a uso público y 2.60% a uso industrial (CONAGUA, 2013).

El principal abastecimiento de agua para la ciudad de Morelia proviene de una red de pozos de extracción (44%), de la Presa Cointzio (23%), de los manantiales: San Miguel y La Mintzita (33%) (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007). Garduño-Monroy (2014) ubica la principal zona de recarga hacia la parte poniente de la ciudad, donde se ha visto multiplicado el crecimiento de fraccionamientos de interés social, datos de (CONURBA, 2012) reconocen la necesidad de conservar las zonas de infiltración que dan origen a la zona de recarga de los manantiales.

Para la realización de este trabajo fueron considerados estudios de cartografía geológica describiendo las unidades litológicas que afloran en el área de estudio, la columna tipo, el análisis de datos estructurales de fracturas para obtener direcciones del movimiento del flujo subterráneo así como datos de apertura de fracturas para obtener la permeabilidad en las unidades Andesita Mil cumbres e Ignimbrita de Atécuaro, también se empleó el método geofísico de tomografía de resistividad eléctrica para caracterizar la geología del subsuelo para lo cual se realizaron dos tendidos, el primero con dirección N-S con una longitud de 2,100 m en el fraccionamiento Villas del Pedregal; el segundo ubicado al norte de Capula con dirección E-O y una longitud de 1050 m.

## 1.1 Justificación

La creciente demanda de agua potable ha traído como consecuencia el incremento de la explotación de mantos acuíferos, generando una sobreexplotación y abatimiento del nivel freático; en casos extremos puede traer consecuencias graves como la disminución de los caudales de ríos, manantiales y zonas húmedas, desaparición de lagos, humedales, pérdida de vegetación, cambios en las propiedades físicas de los acuíferos, hundimientos y colapsos y desertización progresiva. (CONAGUA, 2011). El agua subterránea supone la mayor reserva de agua dulce en las regiones habitadas por los seres humanos, es el soporte de corrientes, lagos, humedales y otros ecosistemas asociados. El incremento de la demanda y su explotación irracional pueden agravar las amenazas en cuatro aspectos fundamentales de la seguridad humana: la salud, la producción de alimentos, el equilibrio de los ecosistemas y la estabilidad social y económica (CONAGUA, 2011). Los estudios hidrogeológicos nos permiten comprender el comportamiento del agua subterránea, determinar las zonas de recarga y descarga y diseñar planes de gestión para una correcta planificación del territorio.

En la zona de estudio el agua que se utiliza es completamente de origen subterráneo (manantiales y pozos). Los estudios a detalle del sistema acuífero permitirán tener un mejor entendimiento del comportamiento del agua subterránea, lo que contribuye a una mejor gestión de los recursos hídricos subterráneos que se aprovechan en la zona de interés.

## 1.2 Hipótesis

En conjunto los estudios geológicos-geofísicos son una herramienta que contribuye a la caracterización hidrogeológica de un sistema acuífero. En este caso se consideraron los estudios de cartografía geológica, geología estructural de fracturas y la utilización del método de tomografía de resistividad eléctrica, esto nos lleva a plantear lo siguiente:

El mapa geológico a detalle permitirá caracterizar la litología de la zona de estudio.

De manera general se asume que la recarga del acuífero es por medio del fracturamiento de las rocas, por consecuencia el análisis estructural de las fracturas ayudara a determinar el porcentaje de porosidad que aportan esas fracturas al acuífero.

La profundidad que puede alcanzarse con el método geofísico de tomografía de resistividad eléctrica será útil para inferir el nivel freático de la zona y la caracterización del medio geológico para definir el tipo de roca en el subsuelo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general:

Efectuar estudios geológicos y geofísicos para contribuir a la caracterización hidrogeológica del sistema acuífero que se ubica al poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán.

### 1.3.2 Objetivos particulares:

- Detallar la geología superficial para obtener la cartografía de las unidades que afloran en la zona de estudio, a escala 1:20,000.
- Definir la columna litológica de las unidades que afloran en el área de estudio.
- Realizar un análisis estructural para estimar la porosidad por fisuración asociada a las rocas fracturadas de las principales unidades hidrogeológicas.
- Realizar un estudio geofísico (empleando el método de tomografía eléctrica) para contribuir a la caracterización de la geología del subsuelo en el área de estudio.

## 1.4 Antecedentes a nivel mundial

Una de las aplicaciones de los métodos geofísicos es la búsqueda de agua subterránea, como complemento en la delimitación de acuíferos y estudios hidrogeológicos. Entre los métodos geofísicos más utilizados está la tomografía de resistividad eléctrica (TRE), el método magnetotelúrico y los sondeos eléctricos verticales (SEV), asociados a rocas ígneas y depósitos sedimentarios principalmente.

Arias-Salguero, (2002) realizó un trabajo sobre las aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica, haciendo hincapié en el hecho de que los métodos geofísicos actúan en la exploración de las aguas subterráneas como métodos indirectos, es decir, ayudan a determinar las zonas más favorables para su aprovechamiento a partir de parámetros físicos del subsuelo. Esto significa que la prospección geofísica orienta la localización de zonas donde existen las condiciones necesarias para que una formación geológica sea aprovechable como acuífero. Dicho autor consideró la prospección geoelectrica para el caso de tres sitios como el método más apto para la exploración de acuíferos. En el primer caso se realizaron 7 SEV ya que no se contaba con información litológica ni afloramientos disponibles, a partir de su distribución se integró un panel de correlación que ayudó a interpretar 5 capas y a determinar el lugar más óptimo para realizar perforaciones. Otro de los casos se realizó en un acuífero volcánico donde se midieron varios parámetros físicos en el pozo, entre ellos la temperatura del agua, conductividad eléctrica del agua, resistividad de las rocas utilizando la sonda normal corta, normal larga y lateral, así como el registro de potencial espontáneo. Integrando los criterios que se obtuvieron en los diversos registros se obtuvo una zona de baja permeabilidad que se asocia con la capa sello de un acuífero confinado. Este tipo de prospección permite definir los niveles saturados de agua, lo cual es de suma importancia, no solo para la evaluación de reservas, sino también para el diseño apropiado de los pozos de explotación

Marvin-Corriols, (2003) realizó estudios geofísicos con imágenes TRE, SEV e hidrogeológicos como hidrogeoquímica para la caracterización del acuífero León-Chinandega en Nicaragua. La geología del área está constituida principalmente por tres unidades geológicas principales; la unidad más antigua compuesta por lavas e ignimbritas, sobreyaciendo a esta unidad se encuentran tobas y pómez intercalados con cenizas, brechas y escorias, hacia la cima se encuentran depósitos piroclásticos. Con los resultados de los SEV se determinó el comportamiento geoelectrico de los diferentes estratos, así como las profundidades al basamento impermeable del acuífero, también permitieron obtener una imagen clara de la estructura interna del acuífero.

En la zona del valle serrano de Argentina Weinzettel, *et al.*, (2017) realizó una exploración geofísica mediante sondeos eléctricos verticales y tomografía de resistividad

eléctrica al sudoeste de la ciudad de Tandil, cuyo objetivo era determinar los espesores del sector acuífero y evaluar las reservas de agua para aumentar la extracción y el abastecimiento a todo el complejo.

Weinzettel, *et al.*, (2017) ejecutaron 13 SEV utilizando la configuración electródica tipo Schlumberger y cinco TRE, con dos configuraciones electródicas: Schlumberger (presenta mayor sensibilidad a las variaciones de resistividad en profundidad) y dipolo-dipolo (detecta mejor las variaciones horizontales, como pueden ser fracturas o zonas alteradas). El objetivo fue conocer la disposición del basamento y detectar la roca alterada y la posible presencia de fracturas. Se estimó el volumen de sedimentos que rellenan el valle utilizando la información de los espesores obtenidos a través de los SEV y las TRE.

La interpretación de los SEV permitió definir la profundidad a la cual se encontraba el basamento hidrogeológico. También se realizó un cálculo de las reservas de agua subterránea presente en los sedimentos acuíferos de la zona de estudio. La base para el cálculo de los espesores fue la roca del basamento, una porosidad eficaz de los sedimentos en un 8%, una posición del nivel freático a 3 m por lo que el volumen de agua almacenado es de  $442.70 \text{ m}^3$

Sierra *et al.*, (2016) realizaron un estudio basado en la combinación de TRE para caracterizar variaciones laterales del acuífero Pampeano ubicado al oeste de Argentina. Dicho estudio contribuyó a la conceptualización del acuífero, por medio de geofísica, análisis químicos del agua, sedimentos y análisis mineralógicos. Entre los resultados se reconocieron cinco capas con contraste de resistividad eléctrica que coinciden con la zona no saturada y cuatro capas acuíferas que poseen diferencias litológicas e hidroquímicas; también se logró reconocer la variación y continuidad lateral de las capas, esta información es posible correlacionarla con el perfil litológico.

## 1.5 Antecedentes nacionales

Los primeros estudios hidrogeológicos en México considerados como tal, iniciaron al terminar la década de los años 40, el conocimiento que se tenía sobre el agua subterránea existente en el subsuelo del país era todavía escaso. No obstante, según Paul-Waitz (1991), este conocimiento impreciso y la carencia de estudios sobre sus posibilidades reales de aprovechamiento no habían sido obstáculos para su explotación con éxito en muchas zonas de la República Mexicana en la década de los años 30. Los primeros estudios para el aforo de aguas subterráneas datan del año 1933 sobre el río Pílon en Nuevo León, donde se utilizó el SEV que era considerado como el más preciso y expedito de todos los existentes (Arreguín, 1998). Otro trabajo relevante es del ingeniero Luis Echeagaray, quien en 1938 publicó un trabajo sobre los tres métodos existentes para aforar aguas subterráneas, el procedimiento eléctrico, los procedimientos de clorantes y el procedimiento basado en la ley de Darcy. Para la década de los 50 fueron publicados los primeros trabajos sobre las provincias geohidrológicas de México, aunque ya se tenían indicios sobre los caudales de los ríos y

estimaciones sobre el agua del subsuelo. Se empezaron a realizar estimaciones sobre el líquido que se infiltraba, de acuerdo con las características topográficas, geológicas y los datos climatológicos conocidos y disponibles hasta entonces. En años posteriores se empezaron a calcular los coeficientes de porosidad, almacenamiento y el volumen de recarga de aprovechamiento de los acuíferos; para 1975 ya se contaba con datos que cubrían aproximadamente el 37% del territorio nacional (Arreguín, 1998). En esta época los problemas y actividades geohidrológicas giraron en torno al desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías en el ámbito de la hidrología subterránea cuantitativa, debido al reconocimiento de que el agua subterránea constituye un recurso natural limitado, ante los ejemplos de sobreexplotación de acuíferos que ya empezaban a manifestarse; dichos ejemplos fueron indispensables para las posteriores investigaciones sobre las características hidrodinámicas, el conocimiento de la calidad del agua, la elaboración de modelos conceptuales del comportamiento de los acuíferos y su modelación. Dos aspectos importantes para el impulso de la geohidrología fueron el desarrollo de los distritos de riego por bombeo y los avances de la industria petrolera en materia de perforación con equipos con sistema rotatorio que se dieron entre 1890 y 1950, los cuales fueron aplicados en la búsqueda de agua en el subsuelo.

En la actualidad en México se han realizado estudios hidrogeológicos muy completos que ayudan a entender el comportamiento del agua subterránea. Los siguientes tienen algo de similitud de acuerdo a la metodología que se empleó en este trabajo.

Existen estudios que abordan la problemática de agua en la cuenca de México. Rodríguez y Ochoa, (1989) realizaron estudios geoelectricos del sistema acuífero de la cuenca de México donde predominan paquetes sedimentarios (depósitos lacustres, aluviones, cenizas, arenas, gravas) en un contenedor de material ígneo (basaltos, riolitas, dacitas). El conocimiento que se tenga sobre el agua subterránea juega un papel importante para el abastecimiento futuro de agua en la ciudad de México, además de que la extracción de agua subterránea de la cuenca representa cerca del 80% del abastecimiento. Los métodos geoelectricos ayudan al proceso de modelación matemática, que requiere de la geometría del sistema para poder predecir la evolución espacial y temporal de un acuífero, y de esta manera la localización y diseño de pozos de producción.

García-Romero, (2012) realizó la caracterización hidrogeológica de un sector del Valle de Iguala Guerrero, elaboró un modelo geológico conceptual mediante el análisis geológico, geofísico e hidrogeológico de la zona. Se identificaron rocas sedimentarias marinas y terrígenas continentales, intrusionadas por el granito Coxcatlan, sobreyaciendo a las rocas sedimentarias se encuentra la Riolita Tilzapotla. Basado en la red piezométrica determinó la dirección preferencial del flujo subterráneo, detecto zonas de deformación en las líneas equipotenciales debido a la incipiente extracción de agua en la ciudad e, identificó que el acuífero se conecta a una laguna muy cercana, ya que esta aporta agua al acuífero. Los parámetros hidráulicos fueron estimados por medio de pruebas de bombeo. Como parte de la exploración geofísica se utilizó el método magnetotelúrico, encontrando la unidad acuífera a

una profundidad de 30 m que varía de 50 a 250 m de espesor. Finalmente determinó un acuífero de libre a semiconfinado.

La tesis de Galván-Mancilla (2013) es un estudio geológico-geofísico, mediante prospección geoelectrica a detalle para determinar los tipos de material del subsuelo, las estructuras geológicas y la presencia de zonas de saturación de agua en la región de Santa Catarina, Nuevo León. Se realizaron tres perfiles con tomografía eléctrica con un arreglo tipo dipolo-dipolo Schlumberger. El estudio geológico-geofísico se enfocó en la determinación de los diferentes materiales del subsuelo, especialmente en las zonas saturadas correspondientes a canales de gravas, los tamaños que se encontraron fueron limos, arcillas, gravas y arenas. Se interpretaron estructuras que asemejan paleocanales con presencia de humedad así como estructuras semiverticales que cortan la secuencia litológica correspondiente a un sistema de fracturamiento; con esas características fue posible recomendar la perforación de un pozo donde fue descrita la litología y se realizaron pruebas de aforo, lo que permitió determinar valores de transmisividad y conductividad hidráulica. Con la medición de los niveles estáticos se obtuvo la dirección del flujo de agua subterránea hacia los ríos principales.

Uno de los trabajos más completos sobre hidrogeología corresponde a la zona del valle de México, desarrollado por Morales-Cacique *et al.*, (2014) donde se realizó un registro litológico mediante una columna litológica de la región. Se describieron muestras de canal y secciones delgadas determinando sedimentos finos (arcillas y limos) intercalados con depósitos fluviales y rocas volcánicas (flujos de lava y depósitos piroclásticos), con la perforación de un pozo y los datos geofísicos que consistieron en registros eléctricos Normal Largo, Normal Corto, Lateral, resistividad y el registro de temperatura. Con lo anterior fue posible identificar zonas permeables, zonas de baja permeabilidad y zonas con alto potencial para el flujo de agua. Mediante pruebas de aforo se determinaron los valores de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento específico. También se realizaron estudios fisicoquímicos e isotópicos del agua, iones mayores y elementos traza.

## 1.6 Antecedentes de la zona de estudio

La zona de estudio ha sido objeto de diversas investigaciones, de índole ambiental, vulcanológica, hidrogeoquímica, vulnerabilidad, hidrogeológica y geofísica.

Uno de los trabajos sobre geología ambiental fue desarrollado por Israde-Alcántara, *et al.*, (2005) en la zona del tiradero municipal, en el estudio se indica que la generación de residuos sólidos se conforma por plásticos y empaques, mezcla de residuos domésticos con los clínicos vertidos industriales y hospitalarios además del escurrimiento de lixiviados



generados que presentan residuos peligrosos, entre ellos metales pesados, subproducto de actividades industriales, los cuales pueden migrar hacia zonas más bajas a través de fracturas. Lo anterior ocasiona que el acuífero sea especialmente vulnerable. También es común la proliferación de fauna indeseable y emisión de gases, en ocasiones tóxicos, como metano y lixina generados en las 34 hectáreas del tiradero de Morelia. El substrato que no favorece a los tiraderos es el de los productos volcánicos, que pueden consistir en conos de arena volcánica y lavas fracturadas de distinta composición. Los contaminantes encontrados en el estudio que superan las concentraciones máximas permitidas, son Cd, Pb, Zn, Ni, Cr y As. Aunque la ubicación exacta de la fuente y cómo es que estos metales entran al sistema de aguas subterráneas no se conoce con precisión, sin embargo la porosidad y permeabilidad del sustrato facilitan la percolación de estos contaminantes a los mantos freáticos.

Estudios realizados por Verduzco-Cedeño (2010) en el área del relleno sanitario de Morelia-Capula, señalan que los contaminantes que se hacen presentes son un foco puntual por la generación de lixiviados y pulsos de infiltración según la temporalidad, tipo y origen de los desechos. Sin embargo, el 52.5% de las fuentes de abastecimiento evaluadas por parámetros físico-químicos presentan condiciones adecuadas para consumo humano. El estudio de metales pesados indicó que en dos sitios el plomo presenta concentraciones por encima del límite; también los valores del cadmio se observaron por arriba de lo que establece la norma NOM-127-ISSA1-1994 como ya lo había señalado Israde-Alcántara, *et al.* (2005).

En los cortes litológicos de los aprovechamientos (pozos de extracción), la arcilla existente en el medio acuífero supone tendencias de absorción de metales pesados que quedan retenidos, por lo que las concentraciones encontradas podrían ser mayores y sobrepasar aún más los valores estipulados por la norma (Verduzco-Cedeño, 2010). En cambio en suelos arenosos por la falta de capacidad de retención, los contaminantes pasan rápidamente al subsuelo deteriorando el agua subterránea. Otro substrato que no favorece a los tiraderos es el de los productos volcánicos que pueden consistir en conos de arena volcánica y lavas fracturadas de distinta composición.

Entre los estudios vulcanológicos más completos destaca el realizado por Cardona-Melchor (2015), quien realizó un análisis del complejo volcánico tipo semiescudo El Águila. Morfológicamente tiene una base de forma casi circular, tectónicamente se encuentra afectado en el lado oriente por la falla Cointzio y en la parte centro-sur por el graben el Águila, causado por la falla Huiramba (Garduño-Monroy, 2009). El complejo volcánico fue subdividido en varias unidades, en las que se describen rocas de color gris y textura afanítica. Por medio de análisis petrográfico identificó una asociación mineralógica en la mayoría de las muestras de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y escaso olivino con texturas seriada, pilotaxítica y porfídica, clasificando a las lavas de composición andesítica y andesítico basálticas.

Cisneros-Máximo (2016) realizó un estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas-Quinceo, describió lavas en bloques, de textura afanítica con múltiples vesículas redondas y una mineralogía de fenocristales de piroxenos, olivinos y en menor cantidad plagioclasas, por lo que fueron clasificadas como rocas en su mayoría de composición andesítico-basálticas. El análisis geomorfológico identificó lomeríos de ligeros a fuertemente disectados en las partes alta y medias del Tetillas, piedemonte en las faldas del Tetillas y planicie hacia la zona de las secuencias fluvio-lacustres.

Un estudio sobre calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública en la región Capula-Cointzio fue desarrollado por Organista-Mota (2017) quien realizó un análisis de parámetros físico-químicos. Los resultados indican que los pozos 23 de Marzo, San Juanito Itzicuario, Ario de 1815, Tacicuario, Rio Florido, El Cerrito Itzicuario y el manantial Balneario Cointzio, presentan diferencias significativas en sus parámetros fisicoquímicos en relación al resto de los aprovechamientos que conforman la red de monitoreo del agua subterránea en la zona. El análisis de elementos traza identificó valores positivos para Pb en un pozo de Capula (0.110 mg/L), La Hacienda (0.100 mg/L) y Arko San Juan (0.015 mg/L); Mn en un pozo de Villa Magna (0.046 mg/L), cerrito Itzicuario (0.181 mg/L) y Tacicuario (0.220 mg/L); también se identificó As. La presencia de Mn se atribuye al origen geológico de la zona, mientras que el As aún se ubica dentro de la norma NOM-127-SSA1-1994 y se atribuye el origen a las granjas avícolas.

Pedraza-Pérez (2018) realizó un estudio sobre la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea al poniente de la ciudad de Morelia utilizando el método DRASTIC, que consiste en clasificar y ponderar parámetros intrínsecos, que reflejan las condiciones naturales del medio; es el método más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos. Dicha metodología incluye parámetros como profundidad del agua subterránea, recarga del acuífero, tipo de suelo, pendiente del terreno, conductividad hidráulica, a los cuales se asignan valores y un índice de ponderación según su importancia.

Dentro de las fuentes potenciales de contaminación se consideraron la actividad alfarera que se desarrolla en Capula, la explotación de material pétreo (Banco Cerritos, Joyitas y Santa Fe), talleres mecánicos, la industria papelera CRISOBA, el tiradero municipal de la ciudad de Morelia y la existencia de 6 gasolineras.

Como resultado Pedraza-Pérez (2018) obtuvo una distribución espacial del grado de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea que varía de muy baja, baja, moderada y alta. El mapa final muestra una vulnerabilidad muy baja al oeste de San Nicolás Obispo, sur de Tacicuario y oeste de Morelia. Una vulnerabilidad de baja a moderada en las zonas de Cointzio, La Concepción, el fraccionamiento Villas del Pedregal, este de San Nicolás Obispo y norte de Capula. Una vulnerabilidad de media a alta en la Mintzita, Capula, norte de Tacicuario, la zona cercana al tiradero municipal, Morelia e Itzicuario.

González-Miranda (2018) realizó un estudio sobre la disponibilidad de metales traza en suelos y agua en la comunidad de Capula, realizando análisis en 6 pozos de extracción y dos descargas de aguas residuales. En general los parámetros físico-químicos como temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, dureza, clasifican al agua de los pozos como aguas aptas para consumo humano y a las aguas residuales como contaminadas. Los análisis químicos (cloruros, sulfatos y nitratos) tanto de las muestras de pozos de extracción de agua subterránea y de las aguas residuales, se ubican dentro de los límites permisibles de sus respectivas normas. La clasificación ICA (Índice de Calidad del Agua) consiste en determinar los parámetros más indicativos y variables de contaminación del agua, a los cuales se les asigna un peso o una ponderación. Los resultados del trabajo indican que las aguas de pozos de extracción están poco contaminadas y las aguas residuales están altamente contaminadas. De acuerdo a las recomendaciones de CONAGUA todos los pozos de agua necesitan tratamiento y las dos descargas no son aceptables para ningún tipo de uso. En el estudio de elementos traza el As no sobrepasa los límites estipulados por las normas NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (0.01 mg/L) y NOM-127-SSA1-1994 (0.05 mg/L). En caso del Cu la concentración en las muestras de agua en ninguno de los casos rebasa la NOM-127-SSA1-1994 (2 mg/L), mientras que las concentraciones en las zonas de descarga son muy altas para tener un origen natural. El caso del Zinc no rebasa la concentración máxima permitida. El Fe sobrepasa la concentración máxima permitida en las descargas. En lo relacionado con los suelos éstos tienen un alto porcentaje de humedad, no son salinos, tienen un pH de alcalino a neutro a ácido, la clase textural varía de franca principalmente al NO de Capula correspondiendo con un Leptosol; a franca arenosa en su mayoría en la parte SE de Capula en Luvisoles.

Pérez-Villareal (2018) es su estudio hidrogeológico del sistema acuífero al poniente de Morelia expone que los mayores abatimientos suceden en las zonas más pobladas como es el caso de los fraccionamientos Villa Magna y Villas del Pedregal al igual que en los pozos de extracción cercanos a la ciudad de Morelia; mientras que la zona con menor abatimiento corresponde de Tacúcuaro a Capula. De acuerdo a datos de pruebas de bombeo el medio volcánico cuenta con una conductividad hidráulica de 0.00007701 m/s y porosidad de 0.02289, mientras que en el medio fluvio-lacustre la conductividad hidráulica fue de 0.0001677 m/s y la porosidad de 0.6348. En las cercanías de Morelia el sistema acuífero pierde su característica de confinado y cambia a libre o semiconfinado (en el paleolago); el cambio a libre se puede asociar a la extracción de agua. Los bombeos de agua subterránea están alterando la dinámica del sistema acuífero. Los flujos de agua van de oeste a este siguiendo la topografía de la zona.

Existen flujos locales, intermedios y regionales; los locales se mueven en los materiales basálticos superficiales y surgen en las zonas bajas por medio de manantiales ubicados en la periferia de la zona fluvio-lacustre, los flujos intermedios se ubican en la mayor parte de la zona de estudio, los flujos regionales se presentan en los estratos geológicos más profundos y pueden entrar en contacto con flujos intermedios por medio de fallas geológicas.

Los diagramas de Stiff indican que el agua subterránea es carbonatada-sódica en su mayoría, en algunos casos carbonatada-magnésica (particularmente en los manantiales).

Los resultados de la modelación matemática muestran que entre el año 2022 y 2030 en algunos sitios la superficie piezométrica quedará por debajo de la profundidad de perforación de ciertos pozos (200 m). Para el final del periodo 2034 al 2038 en los sitios con mayor demanda de agua subterránea (Villas del Pedregal y cercanías a Morelia), el nivel piezométrico se ubicará hasta en 1700 msnm (a 250 m de profundidad), por lo que se recomienda que los nuevos pozos sean construidos a profundidades de 400 m.

## 1.7 Antecedentes geofísicos de la zona de estudio

Aunque se tiene poca información sobre los estudios geofísicos en la zona, se presentan los estudios efectuados por la compañía "Exploraciones Geológicas y Geofísicas" realizados en la zona del relleno sanitario, el área del fraccionamiento Villas del Pedregal y la localidad de San José Itzicuaró.

Israde-Alcántara y Tosca-Delgado (1997), realizaron dos campañas geofísicas en época de lluvia y estiaje, con cuatro sondeos eléctricos verticales con arreglo tipo Schlumberger para lo que se utilizaron 4 electrodos de acero inoxidable 2 (A, B electrodos de corriente) con una abertura máxima de 320 m y 2 (M, N electrodos de potencial) en la zona del relleno sanitario, con las que se construyeron secciones geoelectricas, el objetivo fue determinar las características estratigráficas del subsuelo y zonas de saturación de agua. Como resultados Israde-Alcántara y Tosca-Delgado (1997) detectaron lo siguiente:

-Sondeo número 1, en superficie dos capas consideradas de relleno relacionadas con material fino, las cuales tienen un espesor de 1 m, y resistividades de 10 ohm-m, subyaciendo a esta capa se determinó otra de 29 m aproximadamente, correspondiendo a una colada de lava con resistividades de 600 ohm-m, por último una tercera capa con resistividades bajas de 10 ohm-m correlacionándose con material fino (piroclásticos).

-Sondeo número 2, se detectaron 3 capas consideradas como relleno, tienen un espesor de 6 m y resistividades de 8-20 ohm-m relacionadas con material fino, subyaciendo a estas capas con un espesor de un metro una colada basáltica con resistividades de 1,000 ohm-m, al final de esta capa se detectó otro cambio litológico con resistividades de 1,170 ohm-m y espesor de 14 m correspondiendo a una colada de lava.

-Sondeo número 3, en superficie se detectaron dos capas de relleno con espesor de 2 m y resistividades de 5-20 ohm-m correlacionadas con material fino, seguido de una capa de 10 m con resistividades de 800 ohm-m correlacionada con una colada basáltica subyaciendo a

ésta se detectó una capa de 150 ohm-m de 44 m de espesor y correlacionada con una colada de lava, al término de esta capa se determinó una resistividad de 22 ohm-m de material fino.

-Sondeo número 4, se detectaron 3 capas consideradas como relleno con un espesor de 4 m y resistividades de 8-1,020 ohm-m valores correlacionados con material fino y fragmentos de roca, subyaciendo una colada basáltica de 10 m y 400 ohm-m, seguido de otra capa de 10 ohm-m con espesor de 6 m, la siguiente capa de 34 m y 1,170 ohm-m correspondiendo a una colada de lava por último 10 ohm-m de material fino (piroclástico).

Con base en los sondeos anteriores se realizaron dos secciones geoelectricas.

Sección geoelectrica número 1. Se construyó con base en la información de los sondeos 1,2 y 4 identificando una capa superficial de relleno con espesor variable entre 2 y 6 m; seguida de una colada basáltica de 1-29 m; en la siguiente capa se detectaron unos piroclastos.

Sección geoelectrica número 2. Se construyó con base en la información de los sondeos 3 y 4. En esta sección se considera una capa superficial de relleno con espesor variable entre 2 y 4 m, subyaciendo a esta capa se detectó una colada de lava cuyo espesor varía de 52 m a 56 m, siguiendo una intercalación de piroclastos a una profundidad de 16 a 22 m

Otro de los trabajos realizado por Tosca-Delgado, (2016) consiste en un estudio geológico-geofísico con tomografía eléctrica en la zona del fraccionamiento Villas del Pedregal, cuyo objetivo fue definir la trayectoria de la línea de falla denominada Itzícuaru, dado que es importante definir si esta línea de falla continua en el subsuelo y afecta al fraccionamiento, así como determinar las características estratigráficas de la zona y contactos litológicos entre los diversos materiales. Se consideraron dos líneas de 135 m de distancia para la tomografía eléctrica, con la que se alcanzó una profundidad de 28.4 m, se utilizó un arreglo tipo Schlumberger con 28 electrodos por línea con una separación de 5 m entre electrodo y electrodo.

Los resultados obtenidos en línea 1 indicaron valores altos de 15,143 ohm-m correspondiendo a zonas de roca sana y los más bajos de 550 ohm-m que corresponden a zonas de fragmentos de roca. En esta línea de tomografía eléctrica se observó una variedad de valores eléctricos que oscilan de los 500 a los 15,000 ohm-m en toda la sección, lo que nos indica que no existe una predominancia de un solo tipo de roca, es decir, existe roca sana, roca fracturada y roca poco fracturada con disposición muy errática.

La línea 2 tiene valores de 30,541 ohm-m correspondiendo a zonas de roca sana y los más bajos son de 577 ohm-m que corresponden a zonas de fragmentos de roca. En esta línea de tomografía eléctrica se observa una variedad de valores eléctricos que oscilan de los 500 a los 30,000 en toda la sección lo que nos indica que no existe una predominancia de un solo

tipo de roca, es decir, existe roca sana, roca fracturada y roca poco fracturada con disposición muy errática.

Ambas líneas muestran continuidad de capas características de la zona, con dominio litológico de roca ígnea extrusiva definida como basalto que se presenta muy poroso y muy errático en su ocurrencia ya que se presenta roca sana muy poco fracturada, en otras ocasiones como roca fracturada con muchos vacíos de diferentes tamaños, en otras ocasiones como fragmentos de roca o en lajas, esta roca tiene muchos huecos y fracturas interconectadas entre si y que no presentan un patrón bien definido, sin embargo no se representaron anomalías que pudieran indicar la presencia de fallas en la zona, se infiere un paquete de roca basáltica mayor de 30 m en profundidad.

Tosca-Delgado (2017), realizó un estudio geoelectrico en la comunidad de San José Itzicuaró que actualmente tiene un pozo con una profundidad de 150 m presentando una disminución considerable en el gasto, debido a que en los alrededores de la zona se han perforado pozos con mayor profundidad. El objetivo del estudio consistió en determinar las características estratigráficas e hidrológicas actuales del subsuelo de la zona para encontrar un acuífero que pueda abastecer de agua a dicha localidad. Se empleó un sondeo eléctrico vertical (SEV) con arreglo tetrapolar tipo Schlumberger simétrico, con espaciamiento máximo entre electrodos de corriente  $AB/2 = 295$  m, con un equipo marca SuperSting r1/ip.

Los resultados obtenidos muestran doce capas con diferentes resistividades, que van desde 11 ohm-m hasta 100 ohm-m, correlacionados con materiales de relleno, arcillas, arenas, gravas y fragmentos de roca. Las capas importantes para el posible acuífero son las últimas dos con una profundidad de más de 112 m donde ya hay roca fracturada y resistividades de 45 y 105 ohm- m respectivamente.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Cartografía geológica

Para un adecuado uso del territorio es fundamental disponer de información correcta sobre las características del terreno y su contribución geológica. La cartografía geológica es una herramienta básica en que se recoge esta información. La planificación territorial, el urbanismo, la valoración de los recursos naturales, la prevención de los riesgos geológicos y en particular el estudio del agua subterránea, necesitan el mapa geológico como base fundamental.

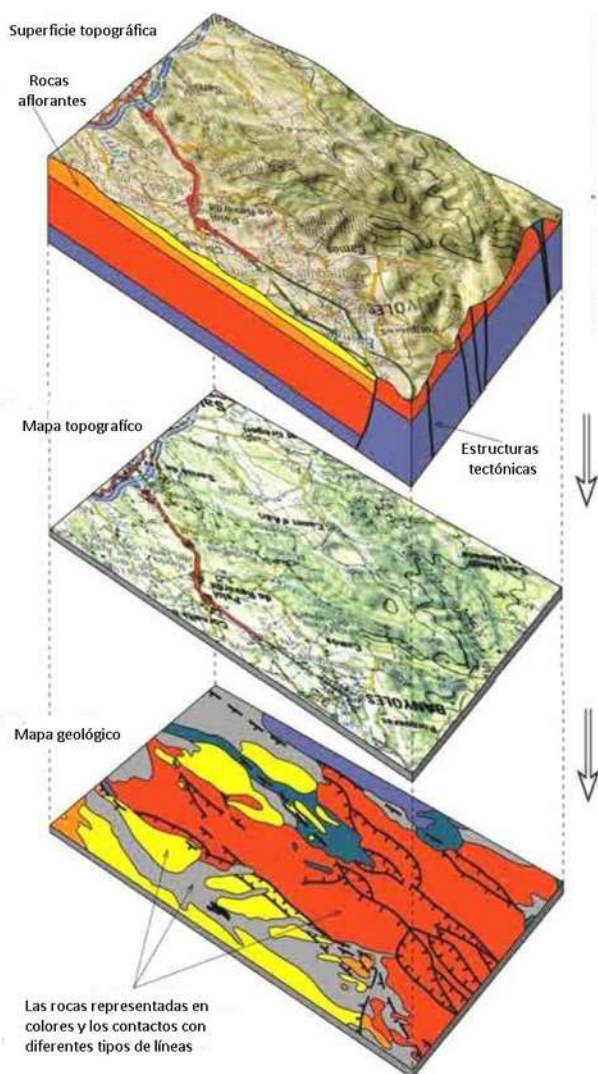


Figura 1.- Esquema de representación de un mapa geológico, proyectado sobre una base topográfica.

Según la definición de Lisle, (2004) un mapa geológico muestra la distribución de varios tipos de roca en un área determinada; es una representación simbolizada y proyectada sobre una base topográfica de los diferentes tipos de rocas y materiales no consolidados que afloran en la superficie terrestre (Fig.1) expresando su geometría, su disposición en el espacio y edad. Sellés-Martínez, (2014) menciona que en una carta geológica se representan, sobre una base planimétrica-altimétrica (mapa topográfico), los diferentes tipos de rocas que afloran en una región determinada. Las rocas se agrupan en unidades geológicas y se estudian las relaciones espaciales y temporales que guardan entre ellas, así como las modificaciones que han sufrido en los diferentes tiempos o eras geológicas. Para realizar los mapas geológicos se obtienen datos directamente sobre el terreno y se elaboran estudios para la caracterización litológica, petrológica, bioestratigrafía y estructural de los materiales. Además se pueden incorporar datos obtenidos utilizando técnicas geofísicas y de teledetección.

### 2.1.1 Etapas del levantamiento geológico

El levantamiento de un mapa geológico requiere las tres etapas siguientes 1) El geólogo en el campo registra la naturaleza de las rocas que son visibles en superficie y características tales como la composición de la roca, la estructura interna y el contenido fósil. Con estas mediciones, es posible distinguir diferentes unidades que pueden ser mostradas en un mapa, por supuesto, no todas las rocas son expuestas en superficie, sin embargo se puede deducir la unidad de roca que subyace a las áreas no expuestas haciendo uso de datos adicionales como el tipo de suelo, la geomorfología e información de pozos (Lisle, 2004). 2) Determinar la localización de afloramientos o puntos donde se han de hacer las observaciones pertinentes. 3) Representación de los datos de campo sobre un mapa. Las tres etapas son importantes pero la extensión abarcada y la manera en que se ejecuta en cada caso dependen de la naturaleza de la zona de estudio, características de las rocas, escala a la cual se ha de efectuar el levantamiento y el objetivo del trabajo (Candel-Vila, 1997).

### 2.1.2 Escala

Es importante tener en cuenta que la escala de trabajo debe buscar un equilibrio entre la calidad y cantidad de información que se debe incluir de acuerdo con los objetivos del mapa. La escala de un mapa geológico no es sólo una cuestión de ampliar o reducir un diseño rígido, sino que la variación en la escala hace aparecer o desaparecer numerosa información (Sellés-Martínez, 2014).

El grado de precisión requerido para el trabajo de campo está sujeto al objetivo del mapeo. Por ejemplo cada afloramiento y cada contacto geológico deben ser localizados con precisión, mientras que en otros casos solo se pide un esquema de la posición y tamaño de las estructuras y formaciones de rocas más extensas. En general los métodos de mayor precisión se incluyen bajo la denominación de cartografía de detalle y los métodos de menor precisión son los de cartografía de reconocimiento o mapas sintéticos (Tabla 1). En los primeros el avance es lento y se necesita más tiempo para cubrir una superficie, el mapa es trazado con un error tan pequeño como consienten los límites de error de la estructura geológica; por el contrario en el trabajo de reconocimiento, la rapidez es mayor y puede permitirse un límite de error mayor. Para cada problema del trabajo de campo se eligen los instrumentos y se aplican los métodos mejor adaptados a las necesidades de cada caso particular (Candel-Vila, 1997).



Tabla 1.- La escala del mapa geológico y algunas de las aplicaciones más usuales.

Escala	Mapas generales	Mapas específicos	Mapas aplicados
>1:10,000 (Detalle)  1:1,000,000 (Sintéticos)	Mapas geológicos	Litológicos Geotectónicos Tectónicos Estructurales Cronológicos Morfológicos Peligrosidad y riesgo	Mineros Geotérmicos Geoquímicos Metalogénicos Hidrogeológicos Ambientales Usos del suelo
<1:1,000,000 (Muy sintéticos)	Mapas geológicos	Suelos Sismicidad Paleogeográficos Cuencas sedimentarias	Hidrotermales De metales, minerales o rocas

### 2.1.3 Usos de las cartas geológicas

Entre los usos principales de los mapas geológicos se encuentran:

- Mineros
- Litológicos
- Estructurales
- Hidrotermales
- Erupciones volcánicas
- Deslizamientos de tierra y rocas
- Inundaciones
- Geomorfología
- Suelos

### 2.1.4 Información que debe proporcionar el mapa geológico

- Ubicación, edad, litología y estructuras.
- Columna estratigráfica
- Esquemas complementarios (cortes adicionales, diagramas)
- Referencias (rastras y símbolos)
- Escala (gráfica y numérica)
- Coordenadas y mapa de ubicación regional
- Dirección del Norte
- Fecha de realización y autor/es

## 2.2 Geología estructural

### 2.2.1 Fracturas asociadas a unidades acuíferas

Las fracturas en las rocas se forman como resultado de la acción de esfuerzos y de la forma en que estos varían en el tiempo (Hatcher, 1995). Contribuyen de forma significativa a la formación de conductos por los cuales pueden transportarse fluidos como agua, hidrocarburos o soluciones mineralizantes, permitiendo que estos recursos se encuentren asociados a reservorios o acuíferos fracturados (Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, 2006). Una fractura es la ocurrencia natural de una discontinuidad en forma macroscópica o microscópica, con tendencia a seguir un plano en la roca generado durante el proceso de deformación, por razones prácticas, se asume que inicialmente están abiertas y subsecuentemente pueden o no ser alteradas y mineralizadas; es por esto que pueden tener un efecto positivo o negativo en la capacidad de permitir fluido a través de la roca (Nelson, 2001).

### 2.2.2 Morfología de las fracturas

Un factor importante que determina en gran parte la porosidad y permeabilidad de las fracturas, es la morfología de los planos de fractura. La morfología relaciona la forma natural de las fracturas; por sus características, se han clasificado en fracturas abiertas, deformadas, rellenas de mineral, de desgarre y relleno, y fracturas incompletamente llenas (Nelson, 2001). Para el caso de estudio se consideran como fracturas abiertas.

#### 2.2.2.1 Fracturas abiertas

Este tipo de fracturas se caracterizan por no presentar material diagenético en el espacio entre las paredes de la fractura, por tal razón no se encuentran cementadas y en consecuencia no contienen algún tipo de mineralización secundaria, el ancho de la fractura es muy pequeño, probablemente del tamaño de poro, pero incrementan significativamente la permeabilidad paralelamente a la fractura y por otra parte hacen que decrezca la permeabilidad perpendicularmente (Fig. 2A).

La porosidad en este tipo de fracturas es importante y pueden funcionar como conductos abiertos por donde pueden circular los fluidos. La permeabilidad es función de la separación inicial de las fracturas, lo que depende de la componente normal del esfuerzo efectivo in-situ con respecto al plano de fractura, y de la rugosidad del área de contacto entre las paredes de la fractura. Este tipo de fractura se evidencia en afloramientos por pigmentación color óxido que se disemina en bandas paralelas a la fractura. Estas características denotan el flujo de agua subterránea a lo largo de los planos de fracturamiento (Nelson, 2001).

### 2.2.2.2 Fracturas rellenas de mineral

Estas fracturas son aquellas que han sido rellenas por una mineralización secundaria o diagenética (Fig. 2B), principalmente por cuarzo o calcita, o ambos; esta mineralización puede llenar completa o parcialmente las fracturas. Considerando esto, las fracturas resultan ser formidables barreras de la permeabilidad. Por otra parte pueden tener un efecto positivo en la recuperación de hidrocarburos al evitar el cierre parcial o total de la fractura; resultan importantes en la predicción y cuantificación del flujo.

### 2.2.2.3 Fracturas deformadas

Este tipo de fracturas involucra a las que inicialmente fueron abiertas en su formación y han sido subsecuentemente alteradas por deformación (Fig. 2C). Dentro de este tipo se encuentran las fracturas de desgarramiento y relleno, y las de lados deslizados. Los desgarramientos o socavaciones, son cubiertos por material fino producto de los procesos de abrasión, trituramiento y deslizamiento. Esto reduce drásticamente la permeabilidad.

### 2.2.2.4 Fracturas completamente llenas

Los sistemas de este tipo de fracturas no aportan atributos positivos al yacimiento, pero pueden aportar información importante para definir los esfuerzos e interpretar el comportamiento estructural y diagenético, tomando en cuenta que las fracturas pueden considerarse como registros de los eventos de deformación y cementación (Fig. 2D).

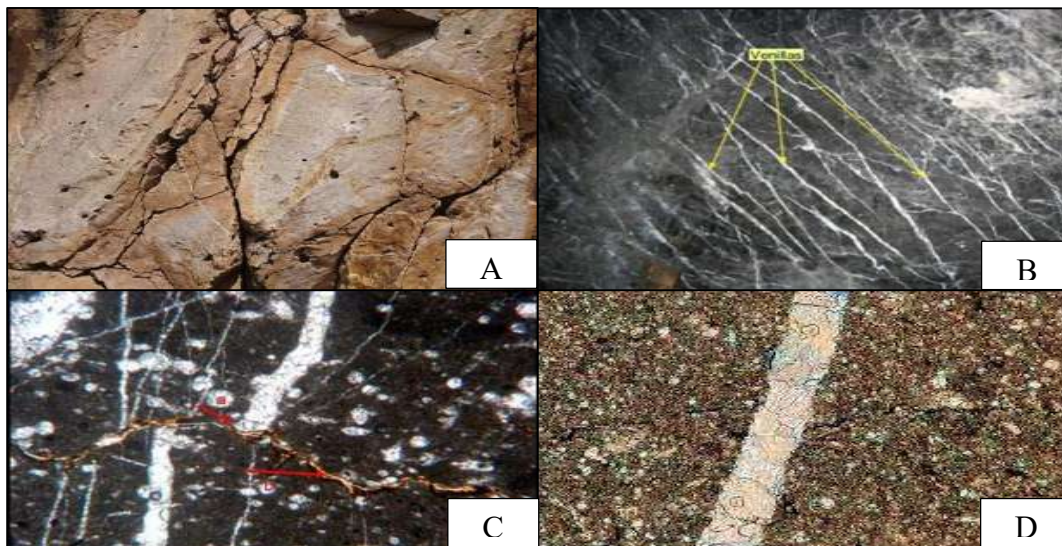


Figura 2.- Ejemplos de la morfología de fracturas. A) Fracturas abiertas. B) Fracturas rellenas de mineral. C) Fracturas deformadas. D) Fracturas completamente llenas de mineral. (Tomado de Nelson, 2001).

### 2.2.2.5 Conectividad entre fracturas

Otros factores que influyen en la permeabilidad son la relación que existe entre familias de fracturas; cuando existen dos o más familias que afectan el mismo volumen de roca y se intersecan formando ángulos más o menos constantes y geometrías semejantes; y el grado de conectividad entre ellas, es decir aunque el medio se encuentre muy fracturado si las fracturas no se conectan entre sí, no existirá un buen manejo del fluido (Laubach, 2004).

La figura 3 muestra las principales formas de los sistemas de fracturas, dentro de los que destacan los ortogonales, conjugados, irregulares y sigmoidales.

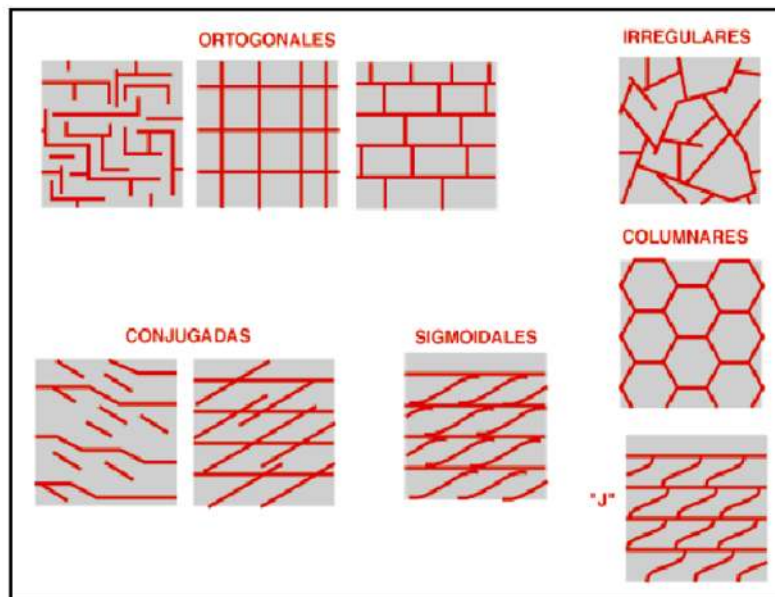


Figura 3.- Relación de conectividad entre fracturas.  
(Tomado de Laubach, 2014).

### 2.2.2.6 Porosidad

Se refiere a los espacios abiertos (poros) en los diferentes tipos de rocas, según la definición de Ríos-Sánchez, (2009).

- En las rocas duras los espacios corresponden a fracturas, diaclasas, planos de estratificación y cavidades producto de la disolución. Estos espacios no tienen una distribución uniforme y se consideran como fenómenos localizados. Este tipo de porosidad se denomina “porosidad secundaria”.

- En las rocas blandas los poros están presentes entre los granos individuales y los minerales. La distribución de estos poros es mucho más homogénea que en las rocas consolidadas. Este tipo de porosidad se denomina porosidad primaria o porosidad intergranular.

#### **2.2.2.7 Permeabilidad**

Se refiere a la capacidad de la roca para transmitir agua según la definición de Ríos-Sánchez, (2009).

- En las rocas duras la permeabilidad está determinada por el tamaño de las fracturas, diaclasas, por el tamaño de las aberturas a lo largo de los planos de estratificación y, por el tamaño de las cavidades producto de la disolución. La conexión entre estas es un factor determinante en el grado de permeabilidad.

- En las rocas blandas la permeabilidad está relacionada con el tamaño de los granos y la selección de los mismos. Altas permeabilidades están asociadas a rocas compuestas de granos redondeados y gruesos que se encuentran bien seleccionados.

#### **2.2.2.8 Ventanas circulares de fracturamiento**

La caracterización estructural de las fracturas así como la caracterización cuantitativa de parámetros de fracturamiento tiene diversos campos de aplicación, entre ellos el de la geohidrología. Autores como Marrett (1996), Mauldon *et al.* (2001), Tripp *et al.* (2004), Nieto-Samaniego *et al.* (2005), Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, (2006), Ortega *et al.* (2006), Watkins *et al.* (2015) entre otros, han propuesto metodologías para caracterizar y analizar patrones de fracturas considerando su geometría y morfología. Este trabajo considera datos estructurales (rumbo, echado, inclinación) así como intersección de planos de fractura para obtener datos de direcciones del movimiento del fluido. Tomando como metodología la propuesta de considerar una línea de muestreo circular, que consiste en dibujar un círculo sobre la superficie estructural en la cual se desarrollan las trazas de fractura, la ventana corresponde al área encerrada por la línea de muestreo circular, considerada como una muestra representativa del afloramiento (Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, 2006).

#### **2.2.2.9 Parámetros de fracturamiento a considerar**

Es necesario contar con herramientas metodológicas que permitan llevar a cabo una caracterización sistemática y eficiente de los sistemas de fractura, sin embargo este objetivo muchas veces se ve interrumpido, dado que en la mayoría de los casos no se cuenta con afloramientos o exposiciones suficientemente extensas de los sistemas de fractura, lo que

dificulta la medición (Moreno-Sánchez y García-Cabrejo, 2006). Cuando en la caracterización de los sistemas de fracturamiento solo se tiene acceso a una exposición limitada del mismo se originan una serie de problemas como son:

**2.2.2.9.1 Sesgo por Orientación.** Consiste en el submuestreo de planos de fractura como resultado de la selección de una dirección de medición que tiende a ser paralela a una familia de fracturas (Barnes et al., 2002; Rohrbaugh et al., 2004) En la figura 4A se observa como una sección estructural levantada en dirección N-S a través de la cara A tendrá en cuenta planos de fractura de dirección E-O y NO-SE, mientras la mayoría de los planos de dirección N-S serán ignorados. En el caso de que la medición se realice a través de la cara B, serán los planos de dirección E-O los que serán subvalorados. En la cara C o superficie estructural se encuentran representadas las trazas del afloramiento en vista de planta de todas las familias de fracturas, excluyendo planos de discontinuidad como estratificación o fracturas paralelas a esta.

**2.2.2.9.2 Sesgo por truncamiento.** Depende de la resolución mínima con la que se tome la información o la escala objetivo del muestreo. Dado que los procesos de fracturamiento ocurren a una gran variedad de escalas desde lo microscópico a lo megascópico (conjunto fractal) la naturaleza local y discreta del proceso de muestreo imposibilita al observador recabar información más detallada que la establecida por sus instrumentos de medición. Como ejemplo en la figura 4B se presenta un sistema local de plegamiento (del orden de kilómetros) sinclinal-anticlinal de dirección NE-SO se encuentra afectado por dos familias de fracturas con orientación N-S vertical y E-W buzando al S. En conjunto las dos familias presentan un patrón ortogonal en vista de planta con igual espaciamiento entre trazas de fractura individuales. Cuando se examina a mayor escala, resolución o detalle, un afloramiento localizado en el flanco S del anticlinal, se aprecia como el patrón ortogonal con igual espaciamiento, parece haber sido reemplazado por otro más heterogéneo, con menor longitud de las trazas de fractura individuales y mayor número de fracturas por unidad de área. Es decir dentro del rango de escalas en las cuales se desarrollan los procesos de fracturamiento se presentan irregularidades por igual en todas ellas (Barton y La Pointe, 1995).

**2.2.2.9.3 Sesgo por censuramiento.** Fenómeno asociado al volumen y a la totalidad de la información estructural medida, en función del área de exposición falible de ser muestreada. Se encuentra relacionado a la disponibilidad de afloramientos suficientemente extensos como para permitir diferenciar las trazas de afloramiento de los planos de fractura sobre una superficie estructural a través de toda su extensión (Rohrbaugh *et al.* 2004). En la figura 4C, el rectángulo A representa la exposición en un afloramiento. Todas las fracturas o porciones de ellas dentro del rectángulo (línea sólida) corresponden a información accesible a medición, mientras aquellas fuera de esta zona (línea punteada) representan información fuera del alcance del observador. En el caso que una fractura comience y termine dentro de la zona de

exposición (afloramiento), su longitud podrá ser definida, pero en el caso que solo parte de ella quede dentro de la zona, este atributo corresponderá apenas a una medida parcial.

Con la utilización de las ventanas y líneas de muestreo circulares, es posible minimizar el sesgo por orientación y manejar de forma conveniente el sesgo por censuramiento. En el caso del sesgo por truncamiento este depende de la mínima resolución con la que se tome la información y por lo tanto está en función del método de adquisición y no del análisis (Mandelbrot 1983).

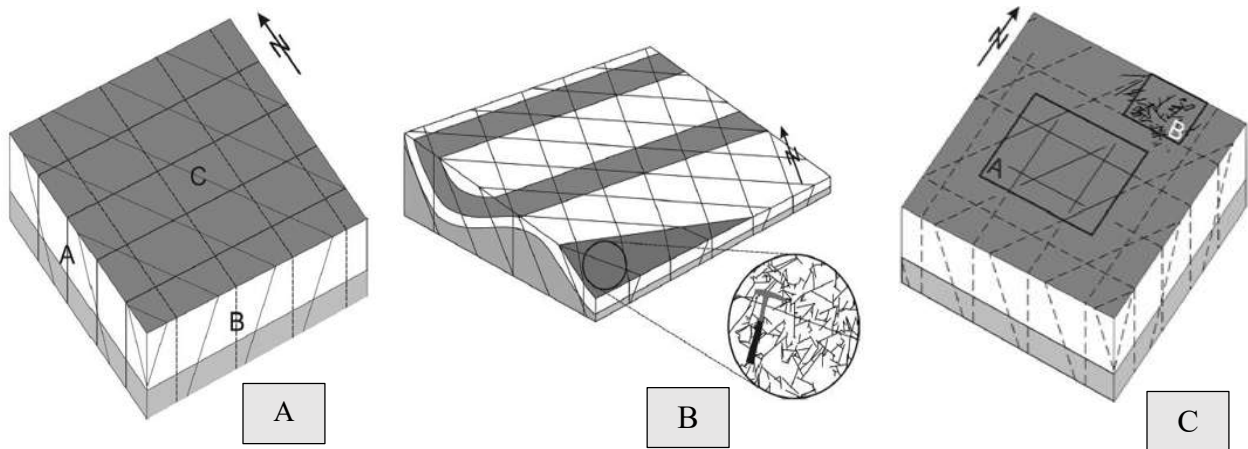


Figura 4.- Clases de sesgo. A) Sesgo por orientación. B) Sesgo por truncamiento. C) Sesgo por censuramiento. Imágenes tomadas de Moreno-Sánchez, García-Cabrejo, 2006.

## 2.3 Prospección Geofísica

### 2.3.1 Tomografía eléctrica

La prospección geofísica se describe como un grupo de técnicas de adquisición que permiten inferir de forma indirecta los materiales que se encuentran en el subsuelo, a través de la interpretación de datos obtenidos en el campo, los cuales representan la respuesta de alguna propiedad física de los materiales que conforman el subsuelo, en este caso la resistividad de las rocas. En tema del agua subterránea los avances alcanzados por las diversas técnicas de prospección geofísica han brindado ayuda al entendimiento de los problemas que comúnmente se presentan en la hidrogeología.

El estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) comúnmente encontrado en la bibliografía como ERT, abreviación de Electrical Resistivity Tomography o Electrical Imaging, es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y de manera lateral (Dahlin, 2001) mediante diversas técnicas y arreglos geométricos de electrodos. El uso de este método ha supuesto un salto cualitativo con

respecto a los métodos de resistividad convencional, técnicas que aunque se han estado utilizando durante varias décadas en estudios de prospección de agua, su limitada resolución les confería en general un papel secundario (Barrera-Mendoza, 2015). En cambio el método de tomografía eléctrica es una técnica multielectródica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado, esto permite realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como de manera lateral, en un breve espacio de tiempo, obteniendo modelos 2-D de gran resolución (Salgado-Pareja *et al.*, 2002).

La tomografía de resistividad eléctrica fue desarrollada para la investigación de áreas de geología compleja (Griffiths, 1993), su capacidad resolutive ofrece enormes posibilidades de aplicación en el ámbito de la prospección geológica, geotécnica, hidrogeológica, ambiental y arqueológica, por mencionar algunas.

Los métodos geofísicos aplicables a la investigación hidrogeológica son variados; sin embargo es necesario aplicar en cada caso el método más apropiado, o bien pensar en la posible combinación de más de un método, para determinar cuál es el más útil para cumplir con los objetivos planteados y obtener mejores resultados al momento de la interpretación.

### 2.3.2 Clasificación de métodos geofísicos utilizados en hidrogeología

Se destacan dos grupos principales: los de inyección de corriente o de campo artificial (con excepción de algunas modalidades) donde el prospector crea el campo físico que va a estudiar; tiene como ventaja proporcionar las características adecuadas para el fin propuesto. En cambio los métodos de campos naturales, estudian las perturbaciones que determinadas estructuras o cuerpos producen sobre campos preexistentes (Fig. 5).

Esto no quiere decir que puedan establecerse relaciones de superioridad entre unos y otros, pues la eficacia depende de cuál sea el problema propuesto.

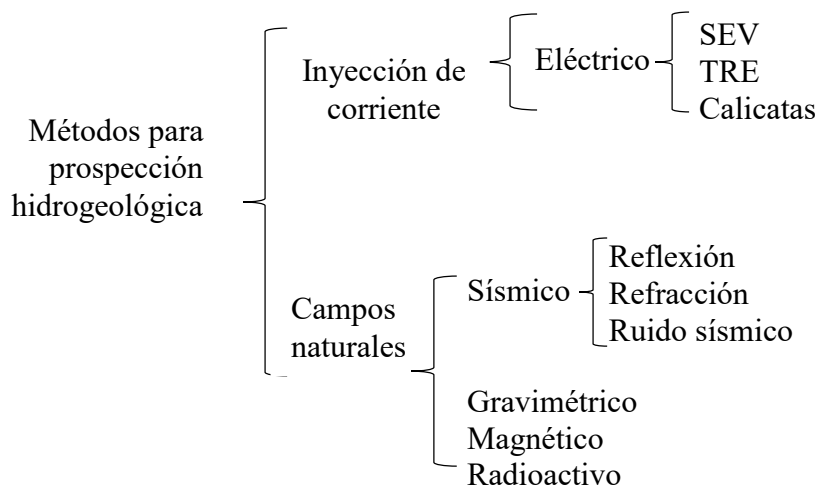


Figura 5.- Clasificación de los métodos geofísicos más utilizados en hidrogeología.



Todos los métodos geofísicos se centran en la medición de algunas propiedades físicas de los materiales como son la densidad de las rocas, las variaciones laterales de la atracción gravitatoria del suelo, la susceptibilidad magnética, entre otras; en este caso nos centraremos en los métodos geoelectricos o eléctricos que se estudian a través de mediciones efectuadas en la superficie y la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética. Existen tres magnitudes electromagnéticas principales, estas magnitudes son la permeabilidad magnética  $\mu$ , la permitividad  $\epsilon$  y la resistividad eléctrica  $\rho$ . Sin embargo la propiedad que más se estudia es la resistividad del subsuelo (Daza Hernández, 2012), debido a que la permeabilidad magnética y la permitividad requieren de mediciones de la muestra en laboratorio, en cambio la resistividad se mide indirectamente desde la superficie.

### 2.3.3 Usos del método

- Detección y caracterización de contactos entre unidades litológicas, de diferente naturaleza, determinando la morfología y localización precisa de tales discontinuidades.
- Detección y caracterización del lecho rocoso, fallas y fracturas, determinando su zona de influencia, rumbo, buzamiento y extensión en profundidad.
- Detección y caracterización de cavidades subterráneas (naturales o antropogénicas), pozos abandonados, huecos tales como accidentes kársticos, canalizaciones, depósitos y rellenos arcillosos.
- Evaluación de obras geotécnicas como túneles y condiciones de cimentación de presas o edificios.
- Detección del nivel de saturación de los suelos.
- Evaluación de sitios por la presencia de rellenos sanitarios y plumas contaminantes.
- Estudio de taludes inestables y deslizamiento de laderas permitiendo obtener imágenes 2D que reflejan con precisión la posición en el terreno de contactos entre roca sana y zonas superficiales alteradas.
- Inspección de fugas y filtraciones en cañerías y presas.
- Detección de tumbas y restos arqueológicos.
- Determinación de unidades acuíferas, niveles freáticos e intrusión marina.

### 2.3.4 Resistividad eléctrica y características eléctricas de las rocas

Cuando introducimos una corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y, conducción electrolítica asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno (Salgado-Pareja *et al.*, 2002). La

conducción electrolítica es el modo de propagación más importante, en el que se basan los métodos de resistividad. Todos los materiales, incluyendo el suelo y la roca, tienen una característica intrínseca, la resistividad, que gobierna la relación entre la densidad de la corriente y el gradiente del potencial eléctrico (Galván-Mancilla, 2013).

Los parámetros que se suelen medir en prospección geoelectrica son: la diferencia de potencial y la intensidad de corriente, pero el parámetro físico básico que se obtiene es la resistividad del subsuelo, es decir, la resistencia específica de las rocas. La unidad de resistividad o resistencia específica es el ohmio-metro ( $\Omega \cdot m^2/m$  o  $\Omega \cdot m$ ), que corresponde a la intensidad de 1 amperio que permite pasar un conductor de sección de  $1 \text{ m}^2$  y longitud de 1 m cuando se le aplica en sus caras opuestas una diferencia de potencial de 1 V.

Sin embargo la resistividad calculada corresponderá a la resistividad aparente del terreno y no a la resistividad real, ello se debe a que el subsuelo está compuesto por distintos materiales, por lo que el campo eléctrico introducido en el terreno afectará simultáneamente a diversas capas, de forma que la resistividad medida corresponderá a un valor intermedio de todas ellas. Solo para suelos homogéneos o para profundidades de investigación muy superficiales, el valor de resistividad medido coincidirá con el de la resistividad real (Barrera-Mendoza, 2015).

### 2.3.5 Factores que afectan la resistividad

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales (Orellana, 1982). Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, el contenido de agua, humedad o presión, composición de las rocas y contenido de arcilla, la textura alterada o porosa unida al contenido en fluidos, la salinidad del agua en los poros y la distribución de tamaño del grano son factores que van a condicionar la existencia de una mayor o menor resistividad (Salgado-Pareja *et al.*, 2002).

Es precisamente esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. En este sentido, incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad (Galván-Mancilla, 2013). En la mayoría de los materiales de la Tierra, la conducción de la corriente eléctrica ocurre completamente en el agua que ocupa los espacios de poro o las fracturas, puesto que la mayoría de los minerales del suelo y constituyentes de rocas son esencialmente no conductivos (Fig. 6). Las arcillas y algunos otros minerales, como la magnetita, la hematita, el carbón, la pirita y otros sulfuros metálicos, se pueden encontrar en una concentración suficiente para contribuir de forma considerable a la conductividad del suelo o de la roca (Orellana, 1982).

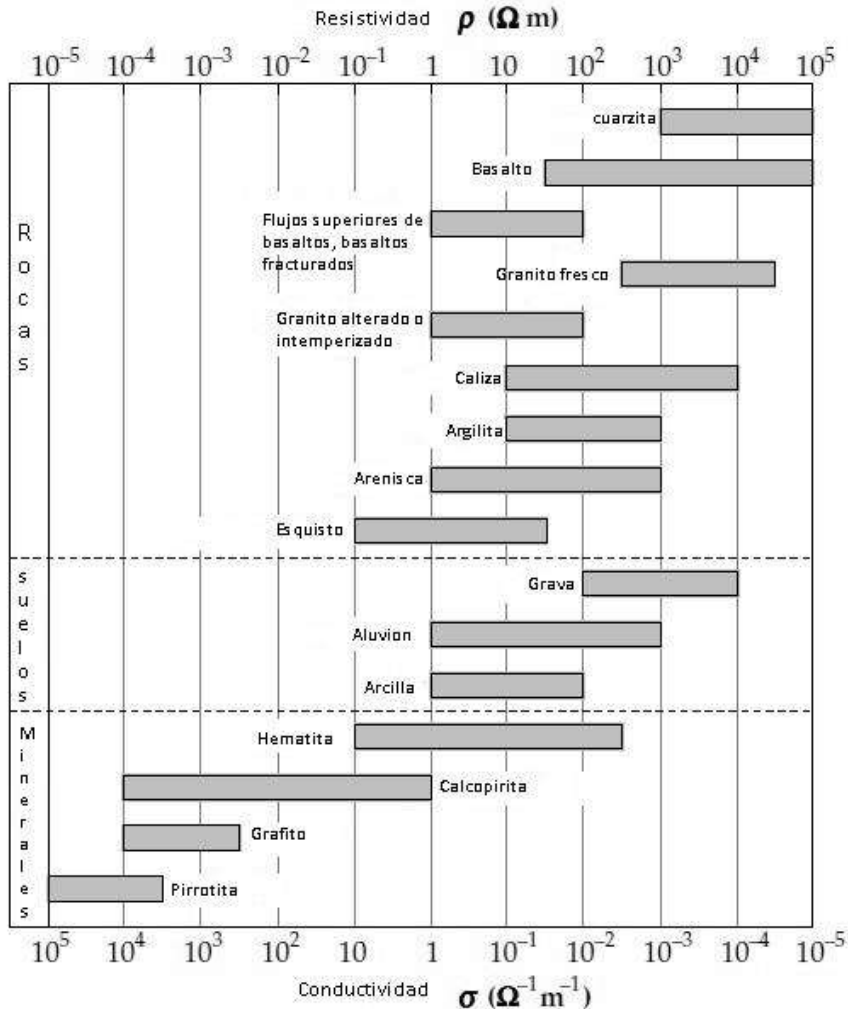


Figura 6.- Rangos típicos de resistividades de algunos materiales (Telford *et al.*, 1990 en Lowrie, 2007)

## 2.3.6 Ventajas y limitaciones del método

### 2.3.6.1 Ventajas

- Técnica no invasiva que permite definir las características del subsuelo, pudiendo realizarse un mapeo de la estructura de los horizontes sin destruir el objeto de estudio (Tabbagh *et al.*, 2000).
- El proceso de captura de los datos totalmente automatizado, permite realizar un gran número de medidas, de forma que se pueden obtener secciones 2-D con excepcional resolución tanto en profundidad como lateralmente.
- Detectar zonas susceptibles de presentar focos de filtración, así como caracterizar geoméricamente el problema (estimar la profundidad del flujo).
- Abordar de forma eficaz problemas en terrenos con elevada complejidad estructural.

- Ubicar con gran eficiencia otro tipo de procedimientos (sondeos o piezómetros), dado que nos marca lugar y profundidad a la que se encuentra la anomalía.
- El procesado de los datos se puede realizar en el campo, mediante la ayuda de una computadora portátil y en un tiempo muy reducido, de esta manera resolver posibles problemas surgidos durante todo el proceso de campo, o decidir la ejecución de nuevos perfiles que inicialmente no estaban proyectados.
- Se puede controlar la profundidad máxima de estudio.

### 2.3.6.2 Limitaciones

- Disponer del material requerido. A diferencia de otros métodos, la tomografía eléctrica precisa de un equipo bastante caro.
- La presencia de material muy resistivo en superficie imposibilita un buen funcionamiento del método, siendo necesario la utilización de otras técnicas.

### 2.3.7 Fundamentos teóricos del método

Independientemente de que la tomografía eléctrica sea una técnica multielectródica, la base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos de resistividad convencionales.

Los métodos eléctricos se basan en la Ley de Ohm ( $R=V/I$ ). A grandes rasgos consiste en calcular la resistividad del terreno inyectando una corriente eléctrica conocida ( $I$ ) mediante electrodos clavados a lo largo de un perfil del suelo y medir la diferencia de potencial en dos electrodos ( $\Delta V$ ) intermedios. Aplicando la Ley de Ohm, la cual dice que debido a la existencia de materiales que dificultan el paso de la corriente eléctrica a través de los mismos el valor de la tensión o voltaje es directamente proporcional a la intensidad de la corriente, se determina que esta diferencia de potencial se ve afectada por las resistividades de los distintos materiales del subsuelo que atraviesa el campo eléctrico (Barrera-Mendoza, 2015)

El principio físico en el que se basa esta metodología está relacionado con el siguiente concepto: mediante un dispositivo electródico, se inyecta una corriente estacionaria a través de un par de electrodos puntuales [A-B], se lee la diferencia de potencial en otro par de electrodos [M-N] (Orellana, 1982). La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad aparente que depende de la resistencia de los materiales presentes en el subsuelo (Fig. 7). Todos estos electrodos se conectan simultáneamente al equipo de medida y mediante un programa secuencial específico para cada trabajo, el aparato “ordena” cuáles deben ser los conjuntos de cuatro electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición.

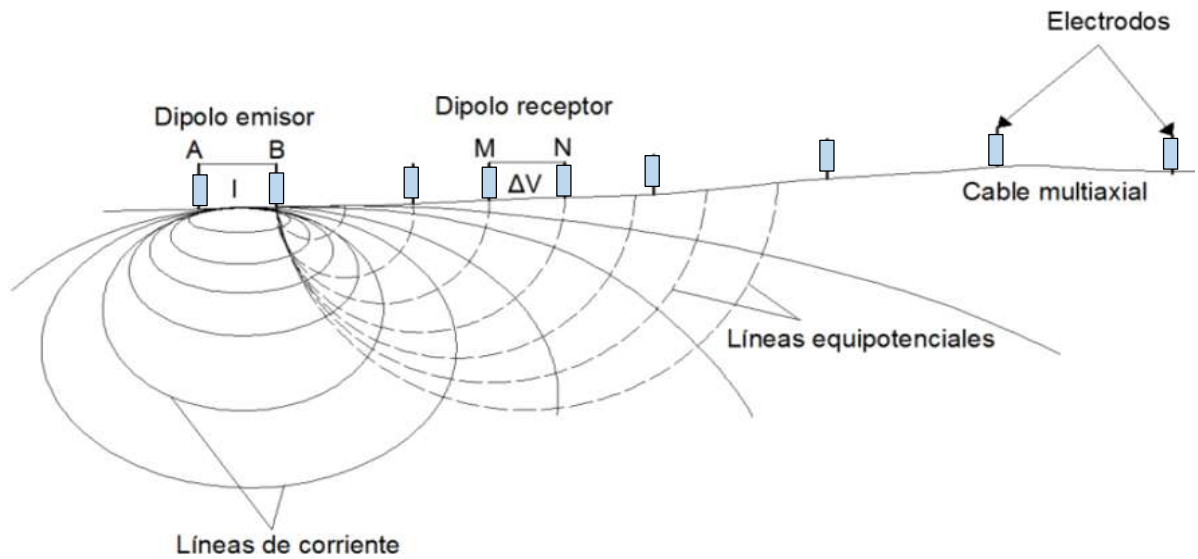


Figura 7.- Fundamento teórico del método tomografía de resistividad eléctrica (TRE). Mediante un dispositivo electródico, se inyecta una corriente estacionaria a través de un par de electrodos puntuales [A-B] y se lee la diferencia de potencial entre otro par de electrodos [M-N].

### 2.3.8 Profundidad de investigación y función de sensibilidad

En los estudios de resistividad, un concepto de suma importancia es el de profundidad de investigación, mismo que fue introducido por Marcel Schlumberger y Conrad en 1932. La profundidad a la cual un método de resistividad permite llegar, depende de la disposición geométrica de los electrodos de potencial y de corriente, de la longitud del perfil (a mayor longitud mayor profundidad) y, de la resistividad del terrero, aunque dicha profundidad no guarda relación directa con la profundidad de la penetración de la corriente, la cual está determinada por la distancia entre los electrodos de corriente (Barker, 1989).

Para tener una estimación que caracterice de alguna manera la profundidad de investigación, se emplea la función de sensibilidad, con la cual es posible determinar mediante las derivadas de Fréchet el comportamiento del potencial medido por el arreglo basado en los cambios de resistividad en una sección del subsuelo, de esta manera, si se obtienen valores altos de la función de sensibilidad, será mayor la influencia de la región del subsuelo en la medición (Loke, 2010). Al momento de emplear la función de sensibilidad se asume que el suelo está compuesto por capas horizontales cuyos límites se extienden al infinito en los ejes  $x$  y  $y$  resultando la siguiente expresión.

$$F1D = \frac{2}{\pi} \frac{z}{(a^2 + az^2)^{1.5}}$$

La ecuación anterior es conocida como profundidad de investigación, su valor máximo se estima en  $0.35a$ , siendo  $a$  el espaciamiento entre el electrodo de corriente y el electrodo de potencial, el valor mínimo tiende a cero de manera asintótica, esta es una forma de aproximar la profundidad de investigación. Sin embargo, Edwards, (1977) y Barker, (1991) consideran otra estimación que se denomina “profundidad mediana de investigación,” esta consiste en asumir que el material por encima de esta profundidad ejerce la misma influencia en el comportamiento del potencial medido que la zona que se encuentra por debajo, aunque dicha profundidad no guarda una relación de dependencia con la resistividad aparente dado que se considera un medio homogéneo (Barrera-Mendoza, 2015).

### 2.3.9 Configuraciones electrónicas lineales

El principio de los cuatro electrodos se denomina cuadripolo o tetrapolo. Los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno (Orellana, 1982).

La disposición geométrica de los electrodos de corriente y de potencial en el terreno al momento de realizar un estudio de prospección geoelectrica se define como arreglo electrónico. A continuación se en listan los arreglos fundamentales:

- Wenner
- Schlumberger
- Dipolo- Dipolo
- Polo- Dipolo

Dichos arreglos difieren entre sí por la distancia entre electrodos, así como la posición de los electrodos de corriente con respecto a los electrodos de potencial.

#### 2.3.9.1 Configuración Wenner

En el arreglo Wenner los electrodos A-B (de corriente) mantienen una distancia “ $x$ ” de los electrodos M-N (de potencial). La virtud de este arreglo consiste en que el espacio entre los electrodos de potencial y de corriente se incrementa constantemente en la misma proporción reduciendo así la necesidad de sensibilidad del aparato de medición (Fig. 8). Por otra parte, esta configuración considerablemente el ruido eléctrico inducido de forma natural por los factores ambientales del terreno.

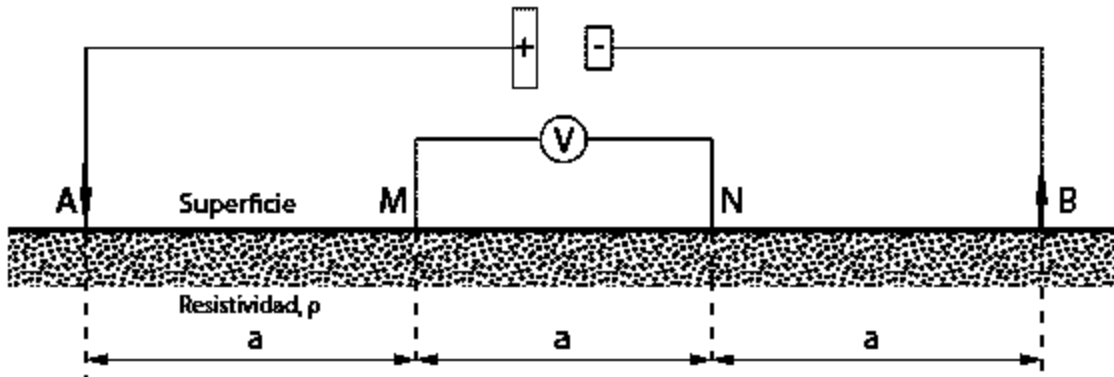


Figura 8.- Configuración electrónica Wenner.

### 2.3.9.2 Configuración Schlumberger

En este arreglo la distancia entre los electrodos de potencial M-N se mantiene constante, siendo la distancia entre los electrodos de corriente A-B la que varía, de esta manera en el nivel  $n=1$  la distancia entre los electrodos de corriente es "a", en el nivel  $n=2$  dicha distancia es "2a", siguiendo esta secuencia para "n" número de niveles (Fig. 9).

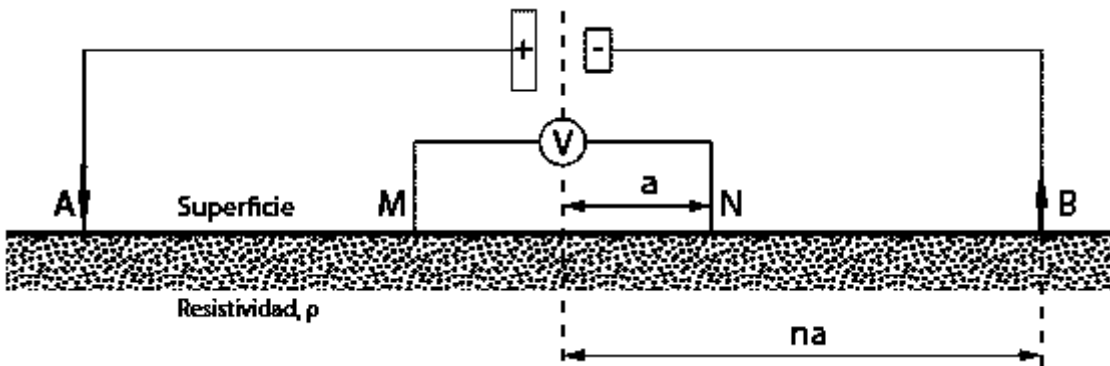


Figura 9.- Configuración electrónica Schlumberger.

### 2.3.9.3 Configuración Dipolo-Dipolo

En este arreglo electrónico, los electrodos de potencial M-N y los electrodos de corriente A-B conservan entre sí una distancia constante, la distancia entre los polos formados por cada par de electrodos varía (Fig. 10). La distancia empleada para los perfiles de resistividad es BM. Es un arreglo que produce una gran cantidad de mediciones. Los electrodos son alineados de tal manera que forman dipolos.

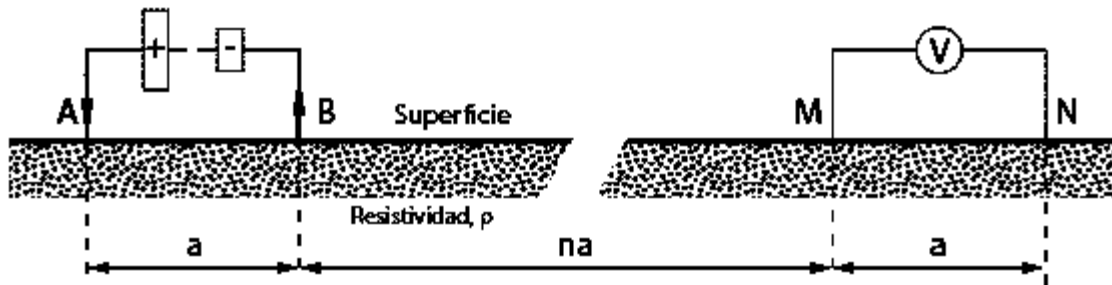


Figura 10.- Configuración eléctrica Dipolo-Dipolo.

#### 2.3.9.4 Configuración Polo-Dipolo

Este arreglo consiste en la colocación de un electrodo de corriente y dos electrodos de potencial formando dipolos a muchas separaciones de la distancia bipolar (Fig. 11). La corriente es inyectada a través del electrodo de corriente cerrando el circuito con otro electrodo que se coloca a una distancia muy grande, la suficiente para que surja el efecto de que se encuentra en el infinito, de esta manera no influye sobre los dipolos de medición, en los cuales la señal eléctrica es recibida y se efectúa la medición de la respuesta del terreno. La profundidad de investigación guarda una relación directa con la separación de los electrodos.

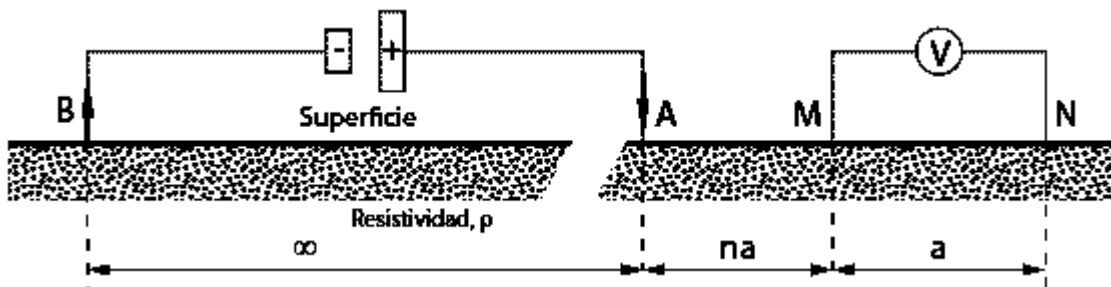


Figura 11.- Configuración eléctrica Polo-Dipolo.

#### 2.3.10 Equipo

El equipo utilizado es el SuperSting R1 Electrical Resistivity IP/SP Meter (Fig.12).

El equipo que se empleó para la ejecución del método consta de:

- Electrodo: son unas barras metálicas de 60 cm de longitud y una pulgada de diámetro, cuyo número variará en función del arreglo eléctrico.
- Cable: tiene una longitud de 2100 m, con conexiones cada 175 m, a fin de poder conectar los electrodos y ejecutar la lectura de resistividad del terreno.



- Ordenador portátil: en él está el software que permite determinar las variables de trabajo como son el tipo de dispositivo electródico, número de electrodos, espaciamiento entre ellos, número de medidas a realizar, procesar y visualizar los resultados obtenidos.
- Unidad central (resistivímetro): es el cerebro de todo el dispositivo, se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente todos los resultados de campo.
- Generador: funciona a base de gasolina, este pasa energía a las baterías para que ellas alimenten al sistema.
- Baterías: es la fuente de alimentación de todo el sistema.



Figura 12.- Equipo SuperSting R1 Electrical Resistivity IP/SP Meter, electrodos, cableado, unidad central, baterías.

### 2.3.11 Procesado de datos de campo

El objetivo es obtener un modelo 2-D de resistividades reales y su distribución en el subsuelo a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenida del terreno, las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos, la resistividad real del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos finitos o diferencias finitas (Ramírez-Miguel, 2010), para ello se emplea un programa de inversión. Estas técnicas de inversión se basan en realizar todo un proceso iterativo para obtener un modelo de resistividades reales, tal que el modelo de resistividades aparentes que genera, sea lo más similar posible a la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo. (Barrera-Mendoza, 2015).

Las siguientes técnicas de inversión, son usualmente las más comunes, el aspecto más significativo entre estos dos métodos de inversión, reside en la eficiencia de los problemas que cada una resuelve.

#### **2.3.11.1 Block inversion method**

El “Block inversion method” ofrece buenos resultados para aquellas situaciones en las que el terreno presenta grandes contrastes de resistividades, es decir que se tengan regiones en donde la resistividad sea homogénea en su interior y a su vez muy diferenciada con respecto a las regiones adyacentes (Loke, 1994).

Esto lo convierte en un método ideal para delimitar con bastante precisión la geometría de cuerpos con resistividades muy diferenciadas entre sí (i.e. situar una tubería en un terreno bastante homogéneo). El principal inconveniente reside en la necesidad de introducir un modelo previo, a partir del cual el ordenador procederá a iterar hasta ajustar el modelo calculado al de campo. En problemas de filtración de agua en el subsuelo, las variaciones de resistividad del terreno serán graduales (en especial en los suelos) por ello esta técnica no es eficiente (Zúñiga-Lara, 2011).

#### **2.3.1.2 Smoothness-constrained inversion method**

El método de inversión suavizado (Smoothness-constrained inversion method) es en realidad el método de inversión óptimo para el análisis de problemas en donde se tengan variaciones graduales de resistividad en el terreno, como por ejemplo en filtraciones de agua o vertidos de contaminantes (Zúñiga-Lara, 2011). Además este método presenta la gran ventaja de no requerir un modelo inicial, a partir del cual empezar el proceso iterativo, este método de inversión es el que maneja el software del AGI earthmager 2D con el que fueron procesados los datos de este trabajo.

#### **2.3.12 Interpretación de los resultados**

Las observaciones se interpretan suponiendo que el subsuelo está compuesto por capas horizontales (Orellana, 1982). Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D) como una sección distancia-profundidad que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica, dicha imagen será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico y que dará información sobre las características físicas del subsuelo.

La detección de filtración de agua en el subsuelo, se basa en localizar disminuciones anómalas del valor de la resistividad en el modelo real. Sin embargo los valores de resistividad que podemos considerar suficientemente bajos como para suponer que puede existir un flujo de agua, dependerán de la litología del terreno y del conocimiento previo de la geología de la zona, ya que de esta forma regiones de similar geología pero con disminuciones de resistividad significativas, podrán ser identificadas como zonas con presencia importante de agua en profundidad (Galván-Mancilla, 2013).

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 Macro localización

El estado de Michoacán se sitúa hacia la porción Centro-Oeste de la República Mexicana, entre las coordenadas 20° 23' 27" y 17° 53' 50" de latitud norte y entre 100° 03' 32" y 103° 44' 49" de longitud oeste del meridiano de Greenwich (Fig. 13). Limita al norte con los estados de Guanajuato y Jalisco, al noroeste con el estado de Querétaro, al este con los estados de México y Guerrero, al oeste con el Océano Pacífico y los estados de Colima y Jalisco, al sur con el Océano Pacífico y el estado de Guerrero. Se divide en 113 municipios. Fisiográficamente forma parte de la Faja Volcánica Trans-Mexicana y la Sierra Madre del Sur. Tiene una superficie de 58,836.95 km<sup>2</sup> que representa el 3.04 % de la extensión del territorio nacional, cuenta con una población aproximada de 4, 584, 471 habitantes (INEGI, 2015). 85, 354.3 ha están ocupadas por cuerpos de agua, el estado cuenta con 30 ríos, 15 presas y 6 lagos. Existen 655 tomas de agua en operación para abastecimiento público de los cuales el 72.5 % corresponden a pozos de extracción (INEGI, 2013).

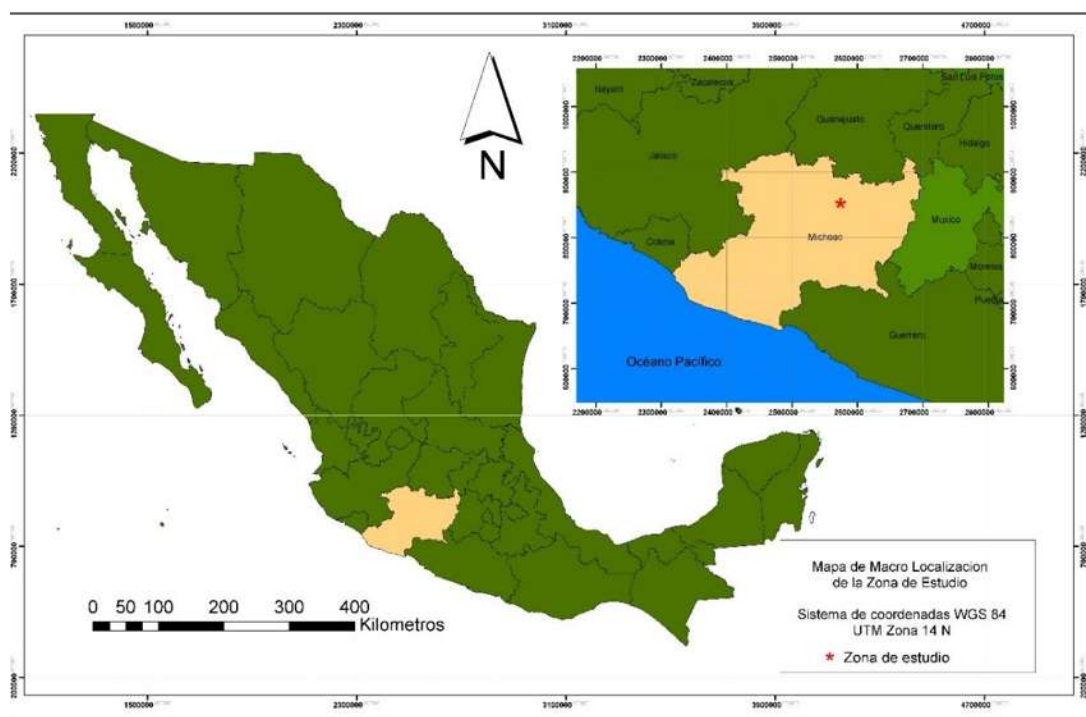


Figura 13.- Mapa de la macro localización de la zona de estudio. El punto \* muestra la zona de estudio.

### 3.2 Micro localización y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra al poniente de la ciudad de Morelia (Fig. 14), entre el libramiento de la ciudad y la localidad de Capula, se localiza en las coordenadas  $19^{\circ} 46'06''$  y  $19^{\circ} 40'25''$  de latitud norte y  $101^{\circ} 11' 22''$  y  $101^{\circ} 23'36''$  de longitud oeste, a una altura de 2,150 msnm. Las principales vías de acceso son la carretera federal No. 15 en el tramo Morelia-Guadalajara, otra es la carretera federal No. 14 Uruapan-Morelia tomando la desviación hacia Coitzio.

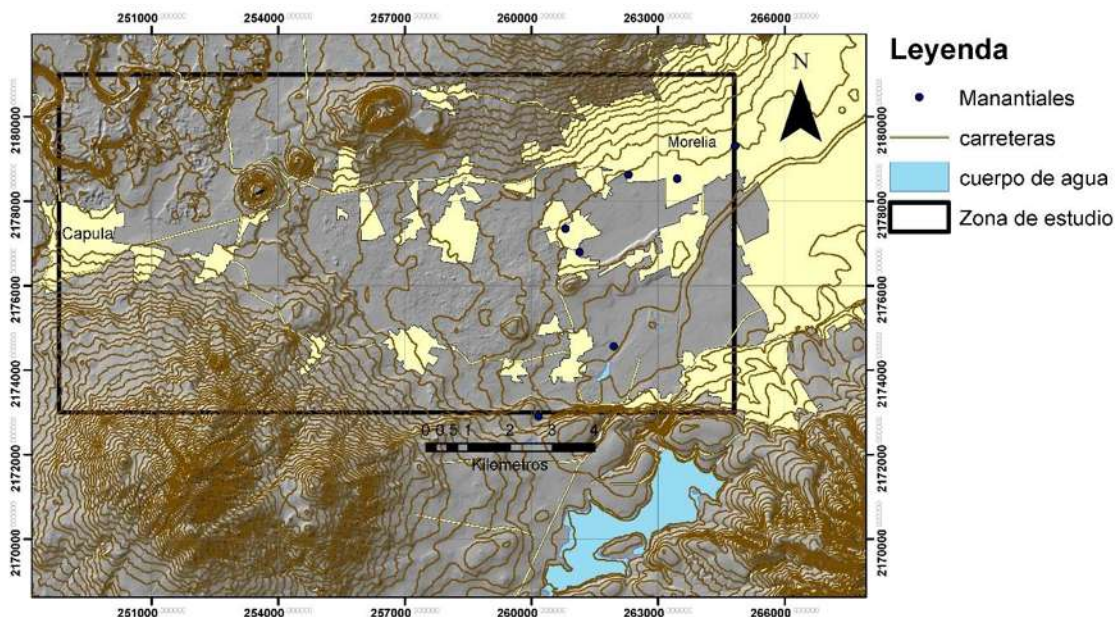


Figura 14.- Mapa de la micro-localización de la zona de estudio comprendida en el recuadro negro, las principales carreteras aparecen en color amarillo.

### 3.3 Fisiografía y topografía

El acuífero Morelia-Queréndaro, según datos de INEGI, (1991) se ubica al norte de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Trans-mexicana (FVTM), representado por vulcanismo del Cuaternario de volcanes monogenéticos que dan lugar al campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985). Cubre parte de dos subprovincias, la Neovolcánica Tarasca que se caracteriza por un vulcanismo reciente y la presencia de un gran número de aparatos volcánicos y conos cineríticos, y la Sierra de Mil Cumbres (SMC) hacia el sur, caracterizada por vulcanismo del Mioceno.

La zona poniente de Morelia presenta rasgos altitudinales que varían de los 1,800 msnm hasta los 3,090 msnm (INEGI, 2005). Sobresalen el pico del "Quinceo" (2787 msnm), el cerro La Arena (2,470 msnm), La Víbora (2,330 msnm), el cerro "Pelón" (2,320 msnm),

el Remolino (2,650 msnm) y el más alto del municipio, el cerro del "Águila" (3,090 msnm) que se encuentra un poco más al suroeste de la zona de estudio (CONURBA, 2012).

### 3.4 Geomorfología

El relieve de la ciudad de Morelia está integrado por un sistema de mesas alargadas en dirección E-O, originadas por la deposición de depósitos piroclásticos provenientes de la Caldera de Atécuaro, esta última localizada en el sector meridional del municipio de Morelia. Estas geoformas tabulares se encuentran inclinadas o basculadas hacia el sur, y son delimitadas por fallas geológicas de tipo normal con ligero componente ¿lateral izquierdo? (Garduño-Monroy, 2001) Las depresiones definidas por el basculamiento de estos bloques de falla, constituyen en la actualidad un conjunto de valles conformados por depósitos lacustres y fluvio-lacustres, sujetos a un proceso de subsidencia como consecuencia de la sobre explotación de los acuíferos. En los sectores oeste, noroeste y este de la ciudad, predomina un relieve a base de rampas asociadas a flujos de lavas y piroclastos, provenientes de los volcanes el Quinceo y el Punhuato.

### 3.5 Hidrografía

Hidrológicamente la zona de estudio pertenece a la región hidrológica No. 12 Lerma-Chapala-Santiago, (Fig. 15 A) que forma parte de la cuenca del Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria (Fig.15 B) dentro del Distrito de Riego Morelia-Queréndaro y en la subcuenca del Lago de Cuitzeo. Las principales corrientes fluviales son el río Grande y el río Chiquito, los cuales cruzan la mancha urbana; los arroyos Atécuaro, la Huerta y Refugio son sus principales afluentes. Cuenta con siete manantiales entre los que destaca la Mintzita, dos cuerpos de agua como son la presa Cointzio y la presa la Mintzita y alrededor de 105 pozos de extracción según Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, (2007) (Fig. 15 C).

### 3.6 Clima

Predomina el clima templado subhúmedo o con humedad media, con régimen de precipitación que oscila entre 700 a 1000 mm de precipitación anual y lluvias invernales máximas de 5 mm. Los promedios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial son 17.4° C, 797 mm y 1,810 mm respectivamente. El régimen de lluvias se presenta de junio a septiembre. Los vientos dominantes proceden del suroeste y noroeste, variables en julio y agosto con intensidades de 2.0 a 14.5 km/h. (INEGI, 2005).

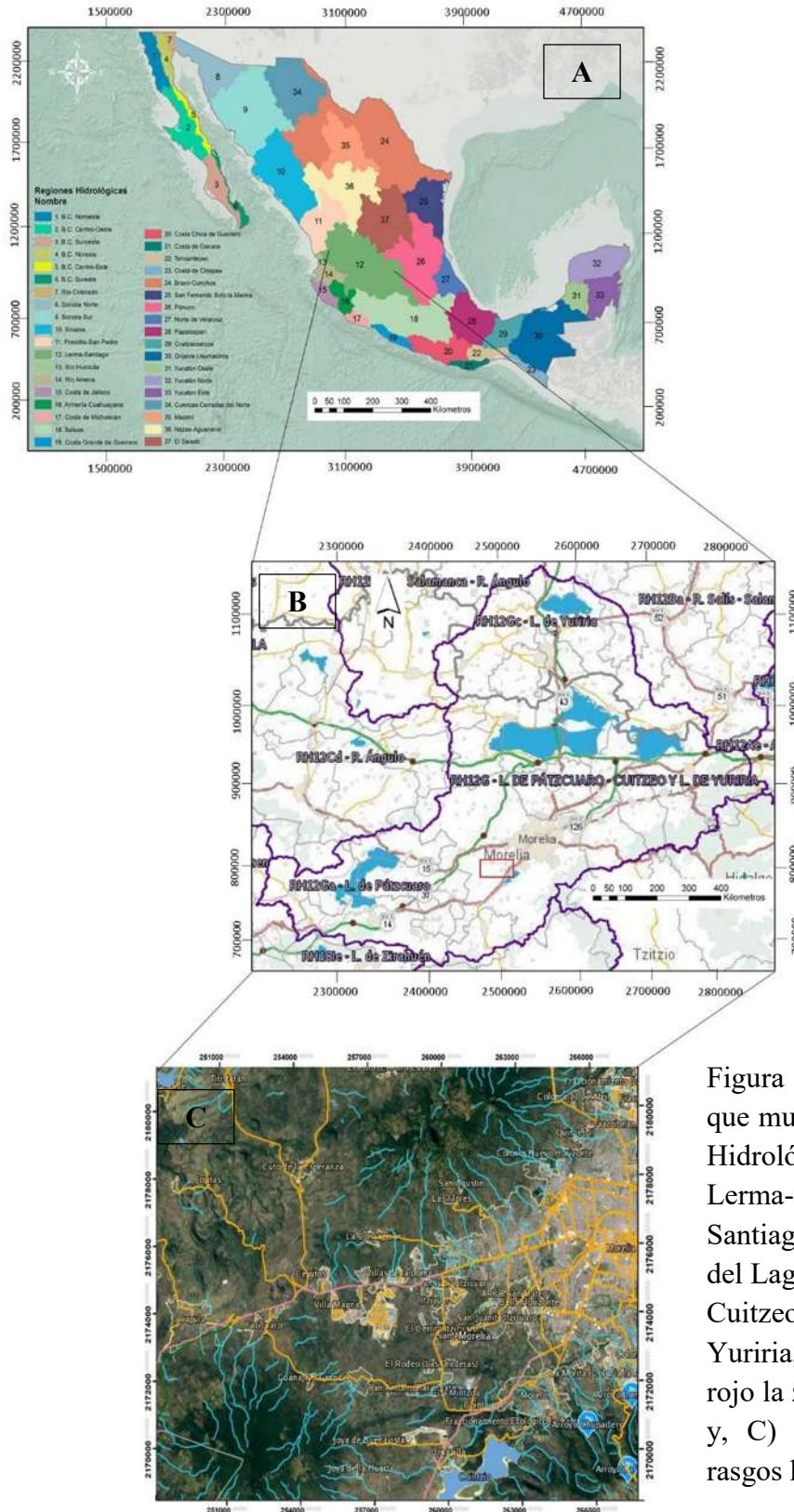


Figura 15.- A) Mapa que muestra la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Chapala-Santiago. B) Cuenca del Lago de Pátzcuaro, Cuitzeo y Laguna de Yuriria, en el recuadro rojo la zona de estudio y, C) los principales rasgos hidrológicos.

### 3.7 Geología Regional

De manera regional la zona de estudio se ubica dentro de La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y forma parte del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) que se caracteriza por ser una región sísmica y volcánicamente activa, en el estado han ocurrido algunos de los sismos históricos más violentos en el Centro de México (Garduño-Monroy *et al.*, 1998) y existen más de 1,000 volcanes monogenéticos dentro de este campo volcánico (CVMG) (Hasenaka y Carmichael, 1985). Algunos de estos centros eruptivos representan el vulcanismo más reciente en el FVTM y son conocidos mundialmente. Estas erupciones históricas ocurrieron en 1759 con la formación del volcán Jorullo y en 1943 con el nacimiento del volcán Parícutín (Luhr and Simkin, 1993; Silva-Mora, 1995).

La Faja Volcánica Trans-mexicana (FVTM) está localizada en la porción centro meridional de México, tiene una distribución bastante homogénea con una dirección general E-O que se extiende por más de 900 km, desde las costas del Pacífico hasta las costas del Golfo de México. Está constituida por distintos conjuntos volcánicos que fueron originados por procesos de subducción y de desgarre continental (Quintero-Legorreta, 2002). Inició su formación hace 14 Ma (Mioceno) y sigue activo en la actualidad (Pasquaré *et al.*, 1991; Ferrari *et al.*, 2012). Las rocas del Cinturón Volcánico comenzaron a ser afectadas por un sistema de fallas hace aproximadamente 12 Ma, la geometría del fallamiento respondió a un campo de esfuerzos de tipo extensivo (Mosser, 1972; Pasquare *et al.*, 1987; Suter *et al.*, 2001) (Fig. 16). Para un mejor entendimiento de su estudio la parte central de la FVTM fue dividida en tres segmentos; el sector oriental está formado por el graben de Acambay, sobre esta estructura se registró un sismo de magnitud  $M_s=6.9$  el 19 de noviembre de 1912, este sismo ocasionó una falla de aproximadamente 52 km de largo y desplazamientos verticales de 50 cm en promedio a lo largo de las fallas normales que flanquean el graben (Urbina y Camacho, 1913). La pared norte de este graben está limitada por la falla de Acambay Tixmadejé y la pared meridional está limitada por la Falla de Pastores (Quintero-Legorreta, 2002).



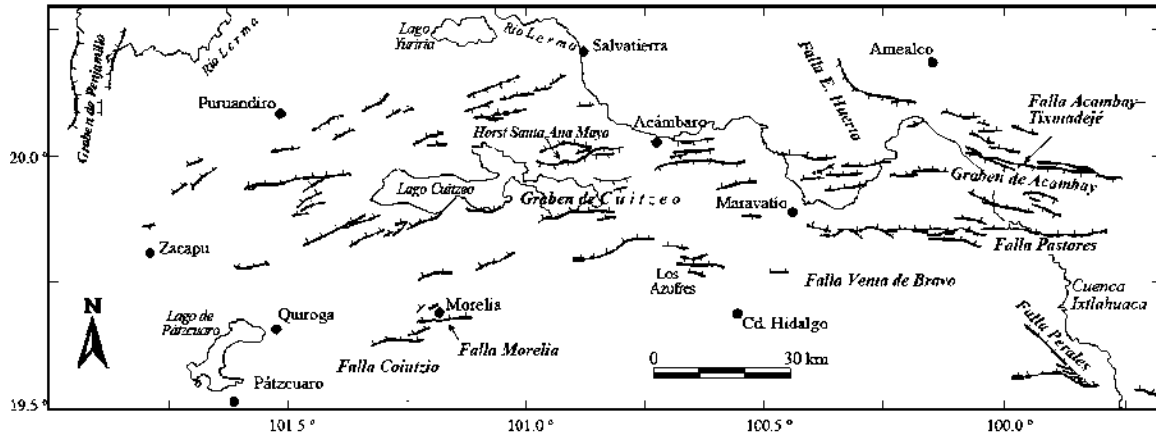


Figura 16.-Patrón de fallas normales del Cuaternario ubicadas en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana, tomada de (Quintero-Legorreta, 2002) (modificado de Suter *et al.*, 2001).

El límite entre el sector oeste y el sector central está definido por una zona de transferencia o relevo entre las fallas normales de Pastores y de Venta de Bravo. El sector central se extiende hacia el este del volcán Altamirano y la ciudad de Maravatío (Fig. 17); la estructura más sobresaliente de este sector es la falla de Venta de Bravo, la cual es una estructura sísmicamente activa que se extiende a lo largo de 45 km. La terminación occidental de este segmento coincide con la terminación oriental del Graben de Cuitzeo, en una zona topográfica baja y llana donde se asienta la ciudad de Maravatío. El sector occidental está definido por el área comprendida entre Los Azufres y Morelia; se caracteriza por fallas normales de orientación general E-O pertenecientes al sistema Morelia-Maravatío-Acambay, algunas de las fallas rebasan los 25 km de longitud y la altura promedio de los escarpes es menor de 100 m. Las fallas definen: 1) una depresión central que corresponde al Graben de Cuitzeo, la cual puede ser trazada desde la región oriental de la laguna de Cuitzeo hasta la región situada al sur de la Presa Solís; 2) un alto estructural localizado hacia el norte del Lago de Cuitzeo y que corresponde al horst de Santa Ana Maya, el cual tiene un relieve topográfico de más de 850 m sobre el nivel del Lago de Cuitzeo; 3) un pequeño graben al interior de la zona volcánica de Los Azufres (Dobson y Mahood, 1985). Además del sistema de fallas E-O, existe un sistema de fallas normales orientado N75°E, el cual presenta escarpes pronunciados de 50 a 100 m de altura.

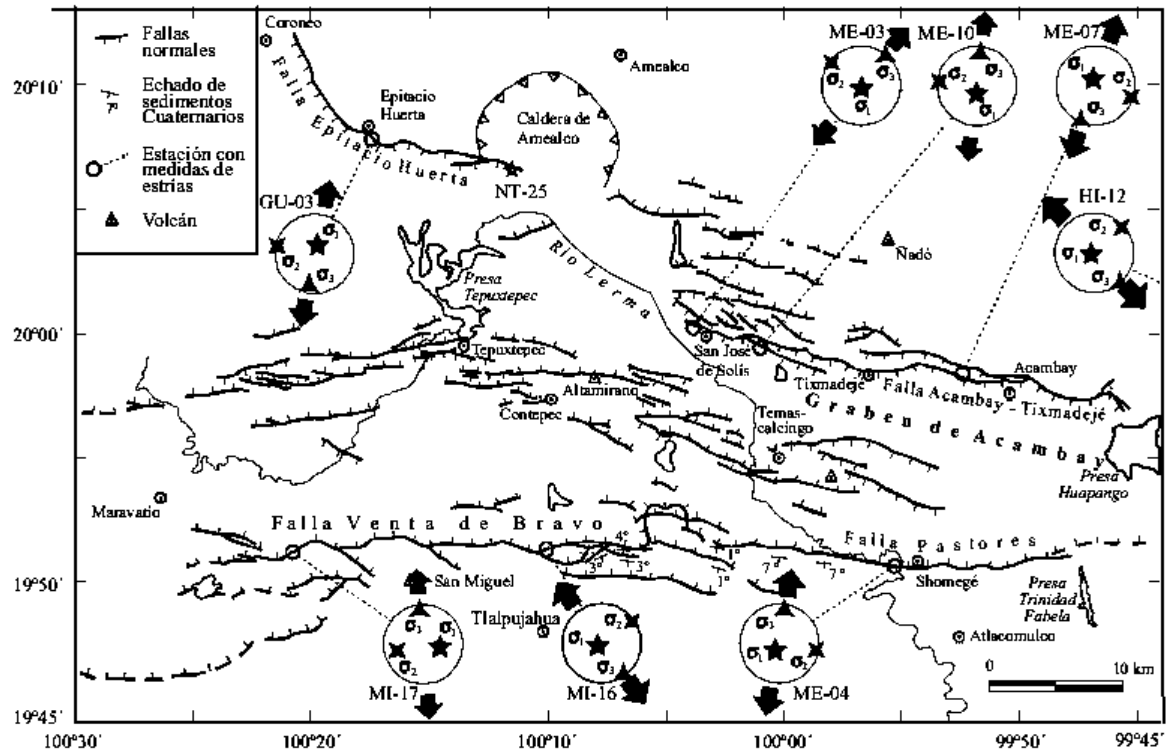


Figura 17.- Tomada de (Quintero-Legorreta, 2002). Patrón de fallas normales cuaternarias de la región de Acambay donde se ubican los sitios donde se realizó el cálculo de paleo tensores de esfuerzos con base en las mediciones de estrías (modificado de Suter *et al.*, 1992; 2001).

El Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG), presenta un régimen extensional, prevalecen las fallas normales con direcciones preferenciales E-O y NE-SO, aunque también hay que resaltar algunas N-S (Garduño-Monroy *et al.*, 2009). Dentro de este campo volcánico se encuentran fallas activas que corresponden al sistema Morelia-Acambay (dirección E-O) como las fallas La Paloma, Morelos y Cointzio en la ciudad de Morelia y los sistemas de fallas de Cuitzeo (dirección NE-SO) que cortan rocas de edades que van del Mioceno al Cuaternario (Quintero-Legorreta, 2002).

La región en la que se asienta la cuenca del Lago de Cuitzeo está conformada por sucesiones volcánicas en las que dominan lavas fracturadas, depósitos de caída piroclásticos (cenizas y arenas de granulometría fina) y materiales sedimentarios aún no compactados, conformados por limos, arenas y diatomitas; éstas últimas dominan en el sector sur de la cuenca. Desde el punto de vista regional el campo geotérmico de Cuitzeo se encuentra localizado en la intersección de dos sistemas estructurales, uno de dirección E-O que corresponden al sistema Morelia-Acambay (MAFS) este sistema de fallas y fracturas es el más joven con generación de vulcanismo monogenético que corta aparatos volcánicos de 700 mil años de edad (Pleistoceno Temprano) en la región de Queréndaro; y el otro es el sistema de fallas NNO-SSE o NO-SE de Taxco-Querétaro (TSMA) estos sistemas de fallas y

fracturas son los más antiguos y afectan a las rocas del Mioceno superior y Oligoceno de la Sierra de Mil Cumbres (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy 1996; 1999).

Ambos sistemas de fallas juegan un papel básico en la región al definir la geometría del fracturamiento y fallamiento, la distribución del vulcanismo y los procesos hidrotermales.

### 3.8 Geología local

La estratigrafía de Morelia está constituida por cinco unidades litológicas, descritas de la base a la cima de la forma siguiente.

#### 3.8.1 Andesita del Mioceno

Esta unidad está constituida por paquetes de derrames de andesita color gris-verdosa intensamente alterada y fracturada, con presencia de vetillas de calcita o de calcedonia que a menudo alternan con horizontes piroclásticos o con otros derrames de composición andesítica-basáltica (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). La edad de la secuencia varía de 20 a 8 Ma (Pasquaré *et al.*, 1991; Silva-Mora 1979; 1995) y Gómez-Vasconcelos *et al.*, (2015) asigna una edad de  $21.5 \pm 0.1$  Ma a las rocas que afloran en la cañada del río Chiquito, en el sector sureste de la ciudad de Morelia, donde flujos piroclásticos blancos y niveles soldados de color vino sobreyacen las andesitas. En el subsuelo de la ciudad estas rocas volcánicas se presentan claramente en los pozos perforados en la zona de Ocolusen, ahí se observan intercalaciones con brechas y productos piroclásticos alterados de color rojo-amarillo. El espesor de esta unidad no se conoce con certeza ya que nunca ha sido atravesada por los pozos profundos, sin embargo se les asigna un valor superior a los 200 m (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 2004). Dentro todo el paquete de andesitas se observan texturas porfídicas, afíricas y vítreas.

#### 3.8.2 Ignimbrita Atécuaro

Es la unidad más antigua que se encuentra en la zona de estudio. Según Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (2005), es una unidad de varios horizontes de flujos piroclásticos de composición riolítica, generalmente de color rosa, ricos en líticos de andesitas y pómez. Se clasifica como una roca piroclástica denominada ignimbrita, también llamada *Cantera de Morelia*, su espesor varía desde pocos metros a más de 200 m. Su origen está ligado a una fase de actividad explosiva que dio lugar a la Caldera de Atécuaro, cuya edad es inferior a los 15 Ma (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). Se le asigna una edad del Mioceno de acuerdo a la fecha de  $18 \pm 0.5$  Ma obtenida por Pasquaré *et al.* (1991).

Las descripciones mineralógicas de Gómez-Vasconcelos *et al.*, (2015) sugiere la existencia de 4 litofacies para esta unidad, diferenciados por color, de base a cima: vino, blanco-grisáceo, rosado y blanco. En general la roca tiene una textura eutaxítica con presencia de sanidina, cuarzo, flogopita, plagioclasa y cristales de biotita rodeada por una matriz vítrea,

bajo el microscopio posee una textura vidriosa con pómez fibrosa y fiambres desvitrificados. Las dataciones por el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dan edades muy similares de entre 16,8 a 16.3 Ma.

### **3.8.3 Secuencia fluvio-lacustre**

Estudios de Israde-Alcantara, (1995) la describen como una secuencia caracterizada por limos y arcillas, según cortes efectuados por perforaciones profundas tiene un espesor hasta de 60 m y presenta un ligero basculamiento de  $5^\circ$  hacia el sur. El análisis al microscopio permitió identificar en los sedimentos lacustres algas constituidas por un caparazón silíceo (diatomeas); las especies presentes sugieren ambientes lacustres con tirantes de agua muy bajos. Hacia el norte, la secuencia sobreyace a un basamento volcánico y está constituida por una alternancia de arenas, gravas y limos (Israde-Alcantara, 1995). Hacia la cima y/o lateralmente descansando en forma discordante se tiene un depósito de caída con espesor variable de 1 a 5 m, de color amarillo, denominado *Alegría* (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002); según su posición estratigráfica es considerado del Cuaternario (inferior a 500,000 años) (Israde-Alcantara, 1995); se considera que puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia (Garduño-Monroy, 1999). Hacia el sur, la secuencia se adelgaza pero conserva su aspecto granular de tipo sacaroide. La secuencia lacustre presenta su más completa exposición en la región de Charo, donde los fechamientos radiométricos en productos volcánicos indican una edad Mioceno Tardío a Plioceno Tardío (Garduño-Monroy *et al.*, 1997). Sin embargo los restos de un *Rhincoterium* (elefante) y de un molar de proboscido, permiten inferir que esta secuencia lacustre puede extenderse hasta una edad Pleistoceno-Holoceno (Israde-Alcántara *et al.*, 1992; Israde- Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999)

### **3.8.4 Secuencia volcánica holocénica del corredor Tarasco o Vulcanismo monogenético**

Es la unidad estratigráfica más reciente de la región de Morelia, corresponde a rocas del vulcanismo monogenético del CVTM. Se trata de lavas de composición basáltico-andesíticas y basálticas que provienen de los volcanes del Quinceo, Las Tetillas y El Águila, que además delinear morfológicamente la cima más importante de la ciudad de Morelia. El volcán El Quinceo fue fechado en 500,000 años y ha tenido reactivaciones en los últimos 10,000 años (Holoceno), como lo demuestran impresiones de mazorcas de maíz encontradas en las cercanías de la hacienda de la Magdalena (norte de la ciudad) (Martínez y Hobson, 1907); dataciones de Gómez-Vasconcelos *et al.*, (2015) sugieren una edad de  $1.5 \pm 0.14$  Ma. El volcán Las Tetillas con una edad asignada por Gómez-Vasconcelos *et al.*, (2015) de  $0.4 \pm 0.08$  Ma; las evidencias cartográficas, morfológicas y estructurales, sugieren que es más joven que el volcán El Quinceo, ambos de tipo escudo. En el sector de Tarímbaro, tanto las lavas del Quinceo como las de Las Tetillas están afectadas por fallas (falla Tarímbaro) con dirección E-O y ENE-OSO, y la falla la colina con dirección E-O. Dentro de este vulcanismo

se encuentra el cerro El Águila, que es un volcán tipo semiescudo, también desplazado por fallas E-O (Garduño-Monroy *et al.*, 2009)

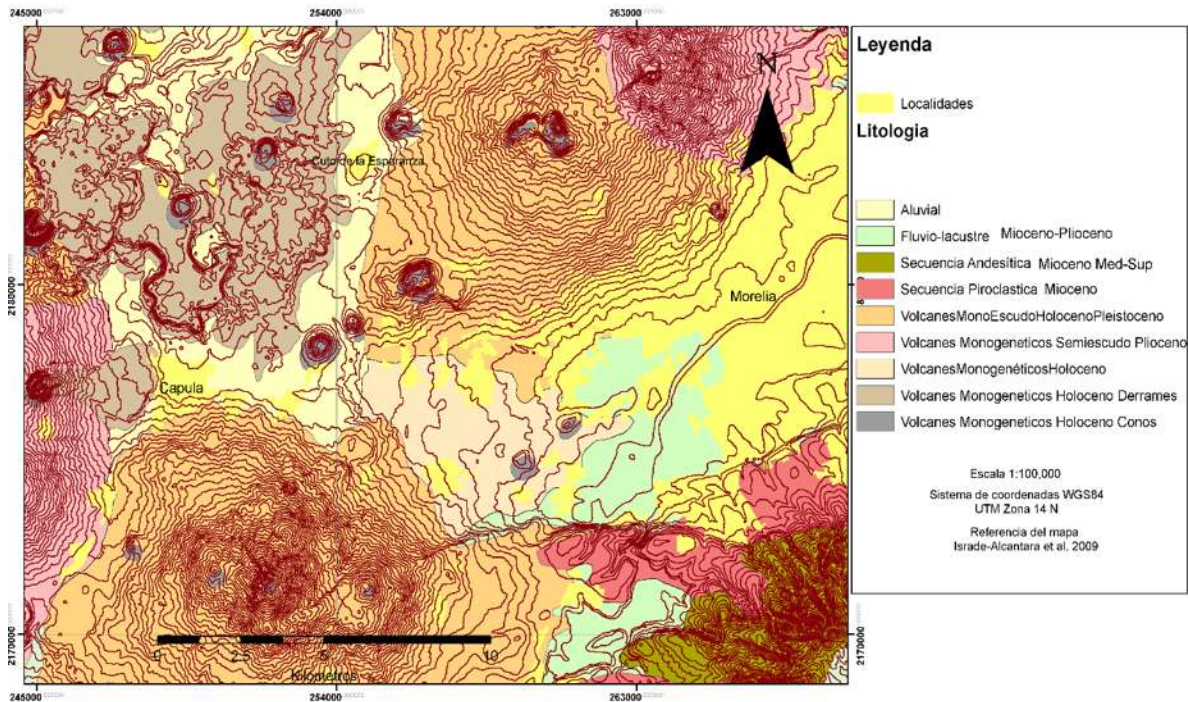


Figura 18.- Geología local de la zona de estudio. Tomada de Israde-Alcántara, (2009).

### 3.9 Dataciones

Trabajos recientes acerca de la evolución espacio-temporal en el área del cerro el Quinceo, Tetillas del Quinceo, el Águila, El Remolino y los volcanes a sus alrededores, permiten recopilar los diferentes fechamientos de la zona los cuales se muestran en la tabla 2. Aunque no existen dataciones para todas las unidades que fueron descritas en la zona de estudio, se decidió incluir la unidad Conos de escoria Tacícuaru, por tener una edad asignada por posición estratigráfica establecida por Cisneros-Máximo, (2016). El mapa de la figura 19 muestra la ubicación de las dataciones; cada número del mapa está indicado también en la tabla 2; en la columna nombre se tomó el nombre de la unidad dada por cada autor, mientras que dentro de la columna unidad se utilizan los nombres de las secuencias nombradas en este trabajo. Las dataciones de estos autores son consideradas como edades absolutas de las unidades que afloran en la zona de estudio.

Tabla 2.- Fechamientos de la zona de estudio

<b>Nombre</b>	<b>Unidad</b>	<b>Años</b>	<b>Edad</b>	<b>Método</b>	<b>Autor</b>
1 Ignimbrita	Ignimbrita Atécuaro	18+/-0.05 Ma	Mioceno	K/Ar	Pasquaré, 1991
Secuencia fluvio-lacustre	Secuencia fluvio-lacustre		Mioceno tardío Plioceno tardío Pleistoceno Holoceno	Radiométricos Restos de Rhincoterium (elefante) y un molar de proboscidio.	Israde-Alcántara et al., 1992; Garduño-Monroy et al., 1997
2 El Águila	Unidad el águila	0.72 +/- 0.08Ma	Pleistoceno Temp	Ar40/ Ar39	Cardona-Melchor, 2015
3 El Remolino	Unidad el Remolino	0.62+/- 0.02Ma	Pleistoceno Medio	Ar40/Ar39	Gómez-Vasconcelos, 2015
4 Cono El Pelón	Unidad andesítica y cono de escoria Concepción	0.84 +/- 0.099 Ma	Pleistoceno Medio	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
5 Domo El Prieto	Unidad Tetillas	0.33+/- 0.008 Ma	Pleistoceno Medio	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
6 Domo Tetillas	Unidad Tetillas	0.34 +/- 0.009 Ma	Pleistoceno Medio	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
7 Lava El Mirador	Unidad Tetillas	56+/- 0.078 Ma	Pleistoceno Medio	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
8 Lava Divisadero	Divisadero	0.11 +/- 0.029 Ma	Pleistoceno Tardío	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
9 Lava Divisadero	Divisadero	0.13 +/- 0.037Ma	Pleistoceno Tardío	Ar40/ Ar39	Cisneros Máximo, 2016
Conos de escoria Tacícuaro	Conos de escoria Tacícuaro		Pleistoceno Tardío-Holoceno	Asignado por posición estratigráfica	Cisneros Máximo, 2016
10 Volcán el Malacate Oeste del cerro Quinceo	Andesita Capula	0.05 +/- 0.2 Ma	Pleistoceno Tardío Holoceno	K/Ar	Pasquaré, 1984

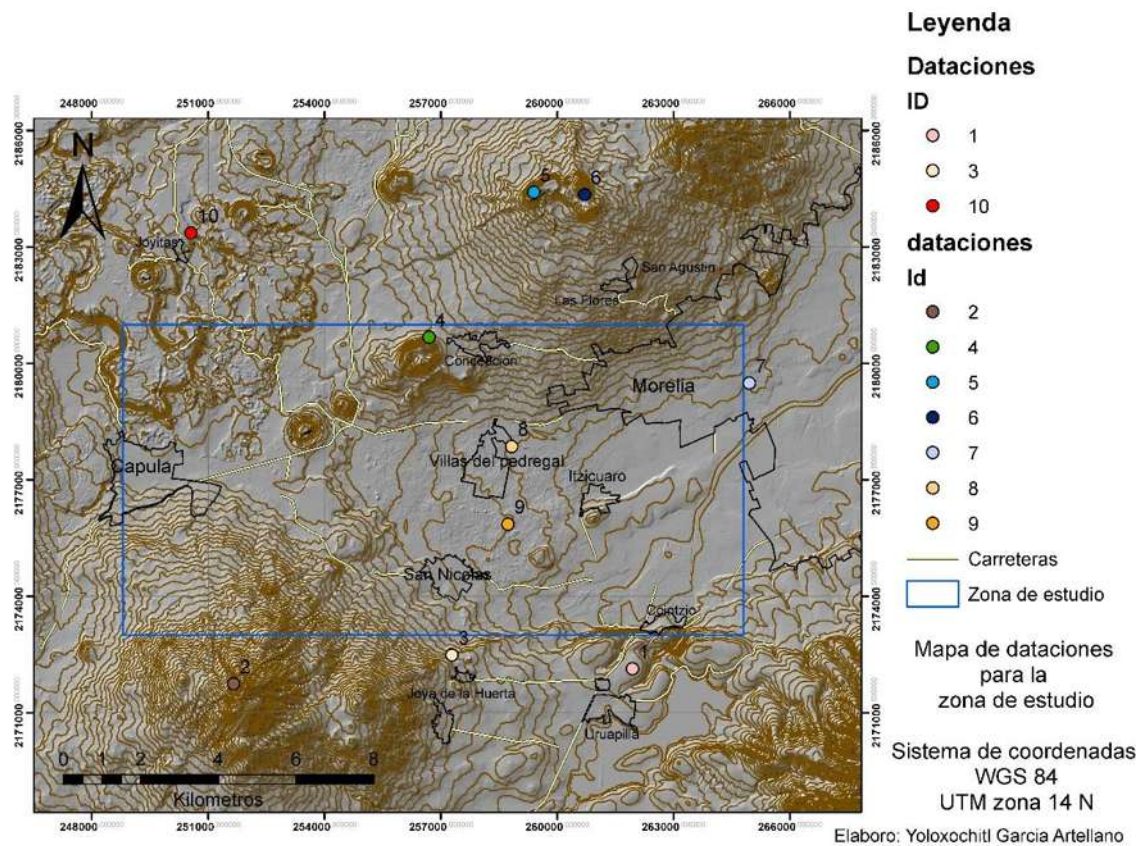


Figura 19.- Mapa de dataciones cercanas a la zona de estudio. En el recuadro azul la zona de estudio

### 3.10 Geología estructural

La zona de estudio es una zona geológicamente joven, caracterizada por la presencia de una fuerte actividad sísmica ligada a la presencia de numerosas fallas activas, de manera regional los sistemas de fallas que se encuentran en la región son: el sistema de fallas NO-SE correspondiente al sistema de fallas de Taxco-Querétaro, el sistema NE-SO y el sistema de fallas Morelia-Acambay con dirección E-O con desarrollo e importancia regional (Figura 20). Las estructuras en la región de Morelia y Cuitzeo han estado activas durante el Holoceno, siendo estas las causantes de rupturas cosísmicas, controlando los terremotos históricos y prehistóricos de la zona (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

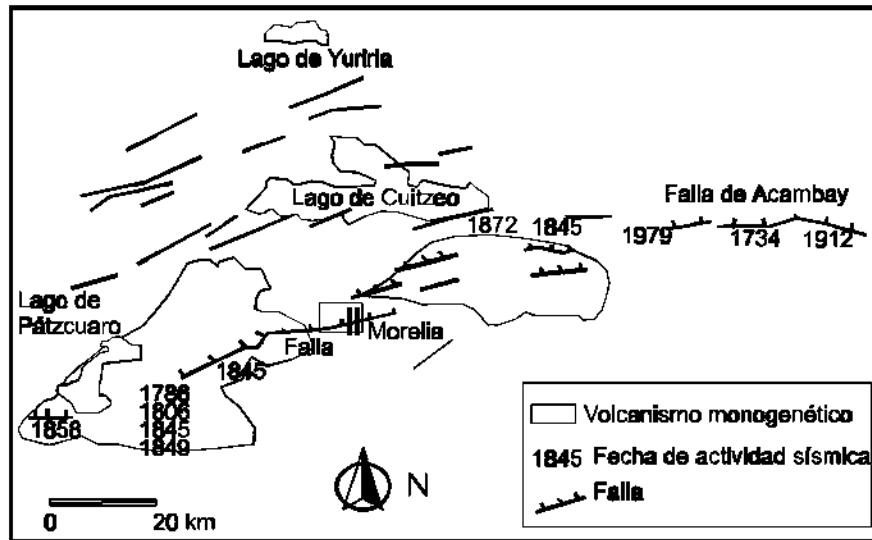


Figura 20.- Sistemas de fallas regionales con orientación NE-SO y E-O. Tomada de Garduño-Monroy *et al.*, (2010).

### 3.10.1 Sistema de fallas NE-SO

Las estructuras NE-SO en Michoacán son las responsables de la distribución espacial del vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco, el cual llega a alinear en una sola estructura a más de 60 conos, con una orientación que varía de N35° a N45°. Principalmente en las rocas del Mioceno, estas estructuras tienen morfología de fallas normales. En la Sierra de Mil Cumbres, las fallas NE-SO se observan claramente, pero no denotan la geometría del tipo de falla. Estas fallas son las que presentan procesos de deslizamiento (*creep-falla*) asociados con desplazamientos verticales en Morelia. (Garduño-Monroy, 2017).

### 3.10.2 Sistema de fallas E-O

Corresponden al sistema de fallas Morelia-Acambay, que es el más joven (8 Ma) y sísmicamente activo en la región, consiste en una serie de fallas normales que a nivel regional son las estructuras más claras. Regionalmente, conforman el graben de Cuitzeo al poniente y el de Maravatío al oriente, ambos separados por la depresión de Maravatío-Ciudad Hidalgo. (Garduño-Monroy *et al.*, 2009). La depresión de Cuitzeo está conformada por una serie de fallas normales que generan una rotación en todas las rocas del Mioceno y Pleistoceno, denotando la presencia de fallas lítricas que generan el basculamiento de bloques.

### 3.10.3 Sistema de fallas NO-SE

La Sierra de Mil Cumbres y la Sierra del Fraile son dos secuencias volcánicas formadas por una serie de rocas que sobreyacen tanto a rocas vulcano-sedimentarias del



Jurásico con metamorfismo de esquistos verdes, como a rocas vulcano-sedimentarias del Cretácico Superior-Eoceno (Capas Rojas) (Pasquare *et al.*, 1991). Los fechamientos realizados en estas rocas extrusivas van desde 18 Ma hasta 7 Ma. Dentro de la secuencia extrusiva de Mil Cumbres hay paquetes andesíticos formados por derrames y de brechas volcánicas de carácter andesítico y dacítico, se observan flujos piroclásticos bien soldados (ignimbritas) y productos de caída relacionados con estructuras caldéricas, éstos sobre todo en la región de Huajumbaro (La Venta) y en las presas de Pucuató y Sabaneta. Todas estas rocas están afectadas por estructuras NO-SE y N-S, a pesar de que su límite norte, está controlado por el sistema de fallas Morelia-Acambay de dirección E-O.

De manera local los estudios de fallas geológicas en la ciudad de Morelia fueron realizados por Garduño-Monroy *et al.*, (1999 y 2001) quienes diferencian dos grupos de fallas (Fig. 21).

#### **3.10.4 Fallas sísmicas**

Datos de (Garduño-Monroy *et al.*, 1999 y 2001) señalan que existen en el estado sismos con tres orígenes distintos:

- a) Los sismos interplaca, ocasionados por la subducción de la Placa de Cocos, que ha sido responsable de los sismos más violentos que ha sufrido el centro de México (1845?, 1985) (Singh *et al.*, 1996) y son también los más comunes.
- b) Los que se asocian a la actividad volcánica, también conocidos como tremores. Estos son menos violentos y generan daños locales, como los producidos por el nacimiento de los volcanes Jorullo (1759) y Parícutín (1943).
- c) Los sismos intraplaca, ligados a rupturas profundas de la placa que subduce (sismo de 1858 de Morelia-Pátzcuaro, con profundidad estimada de más de 30 km) o bien ligados a fallas geológicas que se generan en la corteza de la placa superior (sismo de Maravatío de 1979 y 1999, con profundidades menores a los 30 km).

Estos últimos sismos pueden ser sentidos con mayor intensidad y su recurrencia es superior a 1,000 años (Suter *et al.*, 1995). Están asociados a fallas con direcciones E-O que forman parte del sistema Chapala-Tula o Morelia-Acambay (Johnson, 1986; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Pasquare *et al.*, 1991; Suter *et al.*, 1992, Suter *et al.*, 1995).

Estas fallas en algunos lugares se encuentran ligadas a inestabilidad de taludes. Pertenecen a este grupo las fallas Tarímbaro, La Colina y los segmentos del sistema de fallas Morelia-Acambay como La Paloma, Cerritos y Cointzio (Johnson, 1986; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Pasquaré *et al.*, 1991; Suter *et al.*, 1992).

### 3.10.5 Fallas ligadas a hundimientos

Estructuras que son paralelas a los sistemas de fallas regionales NE-SO y se desplazan continuamente por *creep* o fluencia (Radbruch, *et al.*, 1966).

Estas fallas solo afectan a los suelos y a la secuencia fluvio-lacustre que conforman el relleno de la cuenca donde se asienta la ciudad. Pertenecen a este grupo las fallas La Colina, Central Camionera, Torremolinos y Cuautla, todas con bloque hundido en el lado norte, a excepción de la falla Chapultepec que presenta un bloque bajó hacia el sur. El desplazamiento de estas fallas está asociado al comportamiento mecánico de los suelos (*creep*) y a las técnicas de extracción del agua ligadas a la sobreexplotación del acuífero profundo (Garduño-Monroy *et al.*, 1999).

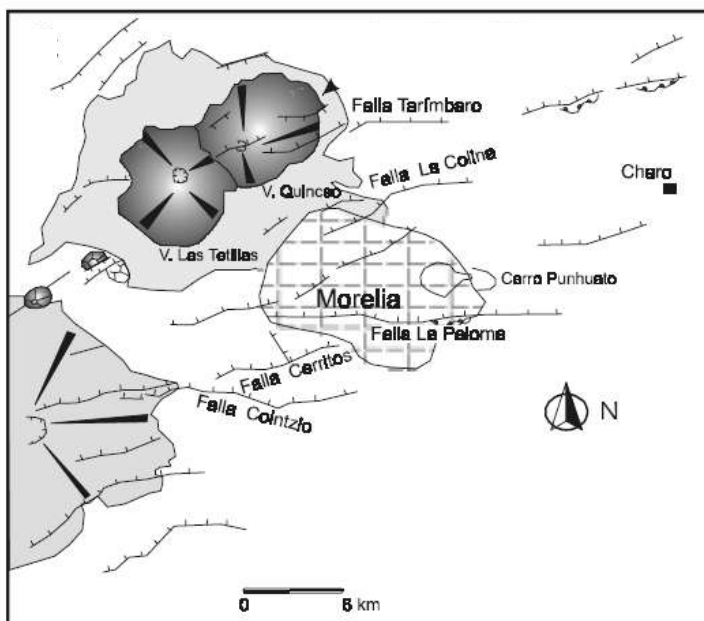


Figura 21.- Fallas geológicas de la ciudad de Morelia. Tomada de Garduño-Monroy *et al.*, (2010).

### 3.11 Geohidrología

Los estudios hidrogeológicos de Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2007) y Garduño-Monroy *et al.*, (2010 y 2014), diferencian las siguientes unidades hidrogeológicas.

-Unidad andesítica: Considerada como el acuífero profundo, compuesta por derrames de lava muy fracturados, esta característica le confiere a la roca una excelente permeabilidad secundaria. Las andesitas alternan con flujos piroclásticos, brechas, escorias y depósitos de caída (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). Su principal zona de recarga se localiza en la zona de

Mil Cumbres y las calderas de Atécuaro y La Escalera. Estas rocas volcánicas son excelentes zonas de recarga del acuífero de la región, por su grado de fracturamiento y morfología.

-Unidad ignimbrítica: Formada por una secuencia de flujos piroclásticos provenientes de las calderas de la Sierra de Mil Cumbres (Caldera de Atécuaro y La Escalera). La secuencia está compuesta de flujos de pómez y ceniza, ceniza y líticos, y flujos soldados, es decir, una roca vítrea muy dura con líticos; toda la unidad es de composición riolítica (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). Esta unidad cuenta con baja permeabilidad debido a la alteración de las plagioclasas, las cuales generan la formación de arcillas que impiden la circulación de fluidos. El fracturamiento es menor que en la unidad anterior (Andesítica) sin embargo, se reconocen los mismos sistemas de fracturas. Estas rocas componen un acuífero en tránsito. El agua subterránea en este acuífero contiene muchos sólidos en suspensión (arcillas) por lo que en el subsuelo no tiene características de un buen acuífero (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). Datos de Pérez-Villareal, (2018) sugieren un nivel piezométrico para esta unidad de 1920 a 1925 m.

- Unidad terrígena: Esta secuencia tiene mayor representatividad en la región de Charo, donde se reconoce una secuencia lacustre y fluvio-lacustre de 40 m de espesor, compuesta por tres paquetes: En la base una serie de sedimentos limo-arcillosos que terminan con un nivel oxidado; la secuencia continúa con diatomitas arcillosas laminares y éstas a su vez, son erosionadas por una secuencia de tipo fluvial, caracterizada por conglomerados, gravas, arenas y limos; la secuencia es coronada por un nivel de pómez vítrea (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). En el subsuelo esta unidad tiene aproximadamente 60 m de alternancias de conglomerados, arenas, limos y arcillas, con eventuales sucesiones de lavas y productos volcánicos explosivos, por ello, esta unidad corresponde a un acuitardo (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). La permeabilidad depende de la litología, siendo obviamente los niveles más granulares los más idóneos para el aprovechamiento del acuífero. Esta unidad presenta fallas con dirección NO-SE, E-O y NE-SO las dos últimas direcciones presentan una geometría de fallas sinsedimentarias que son, junto con el aprovechamiento del acuífero, las que detonan los Procesos de Subsistencia Creep Falla (PSCF) de la ciudad de Morelia. Datos de Pérez-Villareal, (2018) sugieren un nivel piezométrico para esta unidad de 1920, una conductividad hidráulica de 0.0001677 m/s y una porosidad de 0.6348.

-Unidad Volcánica del Corredor Tarasco: Es una serie de aparatos monogenéticos y de tipo escudo (Águila, Quinceo, Las Tetillas) que se encuentran descansando sobre las secuencias lacustres terrígenas (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). Este vulcanismo está compuesto por lavas en bloque, brechas, piroclastos y derrames de escoria. Este tipo de estructuras ocupa grandes superficies, representan zonas de captación para las aguas subterráneas que abastecen preferencialmente a los acuíferos de las secuencias terrígenas. También a ellos se asocian los manantiales que surgen en el contacto de las secuencias volcánicas y las arcillas de las secuencias terrígenas.

Los mismos autores (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy 2007; Garduño-Monroy *et al.*, 2010; 2014) hacen referencia a las zonas de recarga y descarga del acuífero de Morelia definiendo lo siguiente: La recarga más importante se ubica al sur de la ciudad, en la Caldera de Atécuaro, en las sub-cuencas del río Grande y Chiquito, ambas son la recarga principal de los acuíferos alojados en las secuencias fluvio-lacustres, ignimbrítica y andesítica. Durante la temporada de lluvias, en las ignimbritas el agua forma manantiales locales a lo largo del escarpe de la falla La Paloma, esto explica una familia de fracturas primarias sub-horizontales con dirección NO-SE y dos familias de fracturas sub-verticales cuya dirección es NO-SE y NE-SO, que favorecen la infiltración del agua de lluvia (Garduño-Monroy *et al.*, 2010). Datos de Pérez-Villareal, (2018) sugieren un nivel piezométrico para esta unidad de 1825 a 1910 m, una conductividad hidráulica de 0.00007701 m/s y una porosidad de 0.02289.

La zona de descarga del sistema acuífero de Morelia se ubica hacia la margen NE, en el lago de Cuitzeo, siguiendo el eje principal de drenaje cuya dirección es SO-NE y de acuerdo a la topografía de la cuenca del Lago Cuitzeo, la cual responde al fallamiento normal (Garduño-Monroy *et al.*, 2010).

Según datos estadísticos de Ávila Olivera y Garduño-Monroy., (2007) la explotación del sistema acuífero se lleva a cabo a través de 105 pozos profundos, los cuales proporcionan un gasto de 1,618.56 litros por segundo (LPS), lo que representa el 43.93 % del suministro total de agua potable de la ciudad. Garduño-Monroy *et al.*, (2010) exponen que la ciudad de Morelia es abastecida con aproximadamente un 70 % de agua proveniente del manantial La Mintzita y la presa de Cointzio, mientras que el 30% restante se extrae de los pozos profundos. CONAGUA, (2015), reporta que 83 Mm<sup>3</sup>/año se extraen en el valle de Morelia mediante 216 aprovechamientos, el principal uso del agua subterránea es el agrícola (56%) siguiéndole el público urbano (17%).

En su estudio sobre la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro CONAGUA, (2015) recomienda no incrementar la explotación de agua subterránea en el valle de Morelia, específicamente en el área comprendida entre las poblaciones de Cointzio y Charo.

También reportan una sobreexplotación del agua subterránea en el valle de Morelia provocando el descenso progresivo de los niveles del agua del orden de 5 a 20 m en el área localizada entre Cointzio y el poblado de Charo, alcanzando un máximo de 30 m en el intervalo de 1977-1990 (CONAGUA, 2015). Garduño-Monroy *et al.*, (2001) exponen que el acuífero ha sido afectado por sobreexplotación e infiltración de contaminantes a través de estratos y fracturas causadas por subsidencia. Otro factor ligado a la sobreexplotación es el abatimiento del nivel freático, con un promedio anual de 2.46 m (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007); los autores indican que en la parte NE de la ciudad el abatimiento es mayor que en el resto, lo anterior puede deberse a que el sistema de aguas subterráneas de la ciudad

está compuesto por dos acuíferos (uno somero y otro profundo), y en dicha zona los pozos extraen el líquido del acuífero más profundo. CONAGUA, (2015) reporta un volumen de agua subterránea disponible en el acuífero de 5'840,579.64 m<sup>3</sup>; ubican los mayores abatimientos en la zona del Fraccionamiento Ario 1815 y San Isidro Itzicuaró, mientras que un menor abatimiento se encuentra en la zona de San Juanito Itzicuaró. Datos recientes de Pérez-Villareal, (2018) reportan que hacia la parte poniente de Morelia al año 2015 la superficie freática se encontraba entre 49 y 138 metros de profundidad, con un promedio de 74.63 m, considerando un periodo de 21 años (1994 al 2015) el abatimiento ha sido de 44.63 m, presentándose un abatimiento anual promedio es de 2.13 m/año.

Los abatimientos que se generan en el acuífero superficial de la ciudad, dejan el camino libre a los agentes contaminantes que se desechan en la superficie para alcanzar el acuífero profundo. En la parte norte de la ciudad, por el diseño de los pozos, son explotados los tres acuíferos; mientras que, hacia el sur, los acuíferos aprovechados son el profundo y el somero (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2007).

En el mismo estudio publicado por CONAGUA, (2015), se realizaron 50 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en 10 secciones y un estudio hidrogeoquímico, efectuado en 30 aprovechamientos. Concluyen que en el subsuelo de la zona en que se encuentra ubicada la ciudad de Morelia, así como en las áreas circundantes, se manifiesta la existencia de un sistema acuífero de alta productividad, alojado principalmente en las ignimbritas y tobas pumíticas de edad Plioceno Superior, así como en los derrames, brechas, aglomerados y conglomerados de composición basáltica y andesítica.

La calidad físicoquímica es apta para todo uso reportando una salinidad total predominante de 1,000 ppm. La calidad del agua subterránea es apta para el consumo humano en la zona centro y sur del valle aluvial, los pozos que en algunos parámetros rebasan lo establecido por la norma, se ubican al norte y oriente de la zona de estudio (CONAGUA, 2015).

## 4. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se desarrolló en cuatro etapas, la figura 22 muestra el orden de dichas etapas.

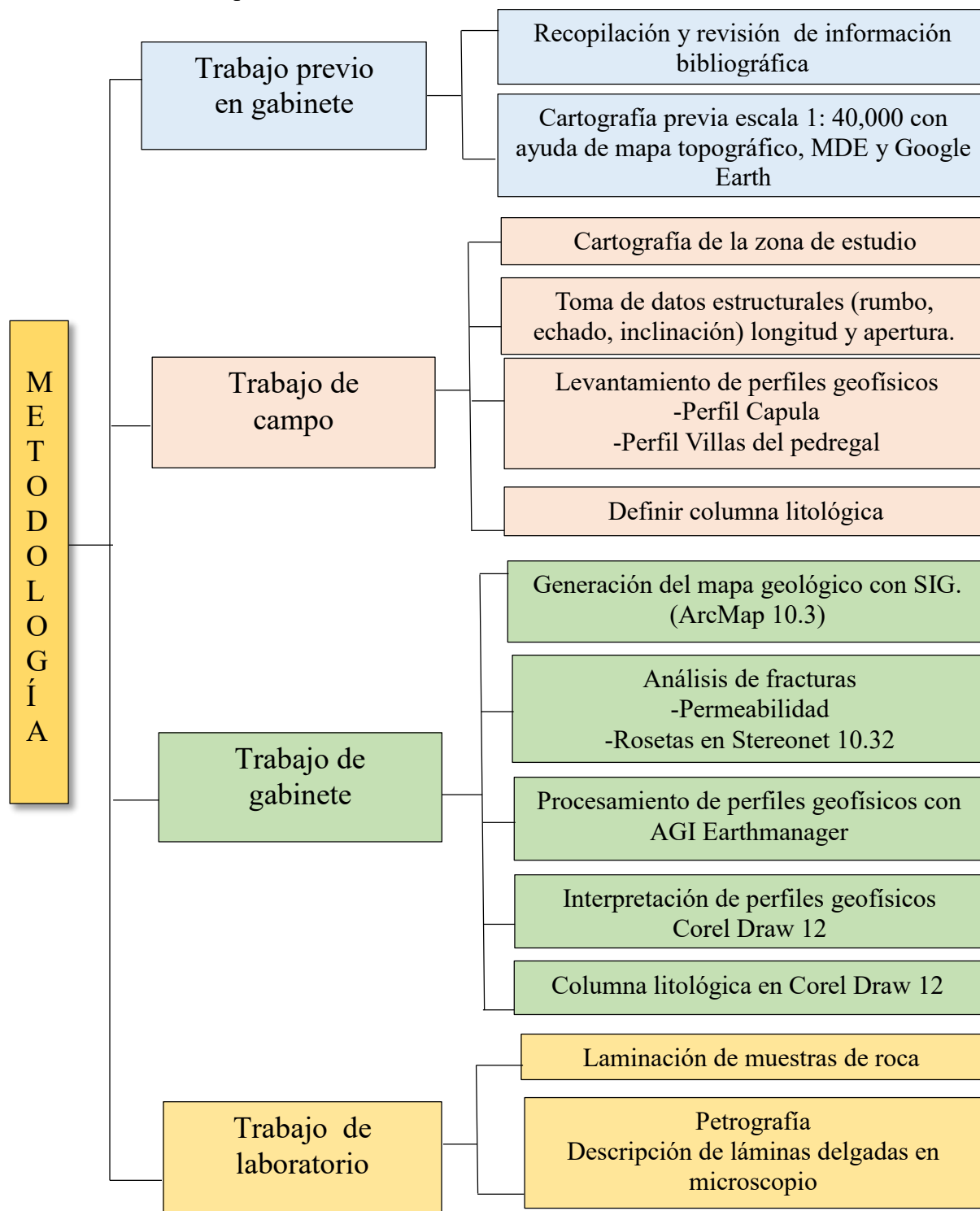


Figura 22.- Organigrama de la metodología del trabajo.

## 4.1 Trabajo de gabinete

Se inició con la recopilación de información bibliográfica de la zona de estudio y revisión de la misma; dicha información fue seleccionada, ordenada y evaluada con el objetivo de conocer el área de estudio. Posteriormente se inició con la búsqueda de mapas topográficos y datos vectoriales en la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:50,000 (cartas Morelia, clave E14A23 y Pátzcuaro, clave E14A22) así como del Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución de 5 m.

Con el modelo digital de elevación e imágenes de satélite obtenidas en Google Earth se inició una cartografía previa del área de estudio a escala 1:40,000, este modelo e imágenes fueron utilizados para identificar las formas volcánicas, ayudar a diferenciar las unidades litológicas y obtener un mapa geológico preliminar de la zona de estudio.

Con ayuda del SIG (ArcMap10.3) se generó un mapa topográfico al que se anexo la cartografía previa para realizar las salidas de campo.

## 4.2 Trabajo de campo

### 4.2.1 Cartografía de la zona de estudio

Con ayuda del mapa geológico preliminar, se empezó la etapa cartográfica. Se realizaron un total de 35 salidas de campo con el objetivo de: corroborar los contactos litológicos delimitados previamente en el trabajo de gabinete, describir de manera petrológica las unidades litológicas encontradas (Fig. 23A), recolectar muestras de roca correspondientes a cada unidad, tomar puntos GPS de los afloramientos para ubicarlos en el mapa topográfico y así delimitar las unidades que afloran en la zona de estudio (Fig. 23B). Cabe señalar que la escala utilizada para el trabajo cartográfico es 1:20,000. En total fueron recolectadas 28 muestras de roca de las cuales seis fueron descritas de manera petrográfica.

### 4.2.2 Mapa geológico en SIG

Esta etapa consistió en la digitalización del mapa geológico en un SIG (ArcMap 10.3), se cargaron las curvas de nivel, se ubicaron los pozos existentes en el área de estudio, los afloramientos identificados en el trabajo de campo, los puntos de las muestras de roca recolectadas, las fallas principales y, se delimitaron los polígonos correspondientes a las unidades litológicas descritas en campo.



Figura 23.- Trabajo cartográfico. A) Descripción petrológica de las muestra de roca recolectadas en el trabajo de campo. B) Toma de puntos GPS de los afloramientos.

### 4.3 Geología estructural

Para el análisis de la geología estructural se trabajaron dos sitios, uno ubicado en “los Filtros Viejos” en la unidad Andesita Mil Cumbres y, otro ubicado en la loma de Santa María en la unidad Ignimbrita Atécuaro. En cada uno de los afloramientos se delimitó un área de muestreo o ventana de muestreo, en este caso marcando círculos de 1 m de diámetro (Fig. 24 A). Con ayuda de una brújula tipo brunton y siguiendo la regla de la mano derecha se midieron datos estructurales (rumbo, echado, inclinación) de todas las fracturas que estuvieran dentro de la ventana de muestreo; con un flexómetro se midió la longitud de cada fractura. Finalmente, con ayuda de un aperturímetro se midieron las aperturas en el centro de cada fractura (Fig. 24 B).



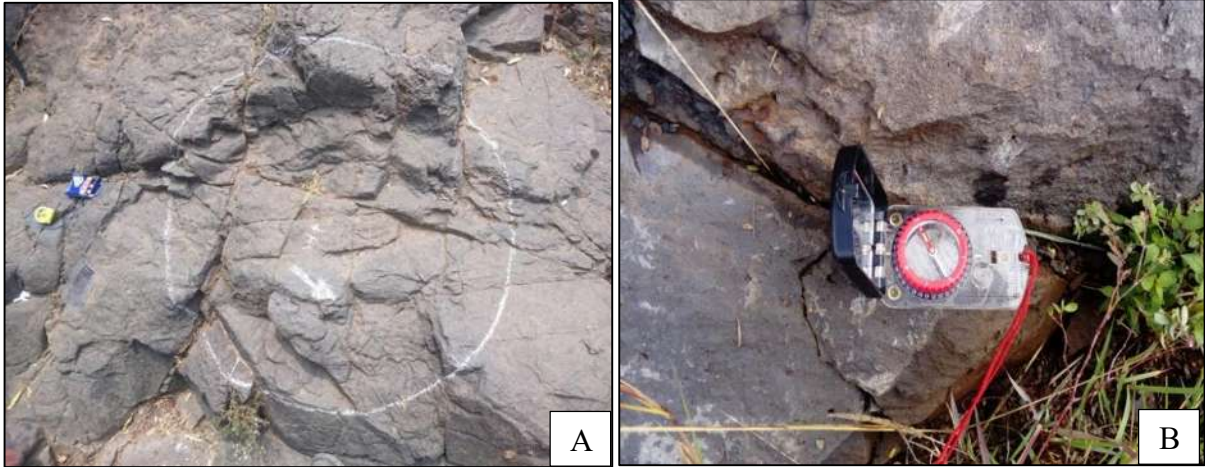


Figura 24.-Geología estructural. A) Ventana de muestreo circular donde fueron tomados los datos estructurales. B) Toma del rumbo en una fractura dentro de la ventana de muestreo.

#### 4.3.1 Utilización de Stereonet

Los datos estructurales de fracturas de cada círculo fueron graficados en el programa Stereonet 32.101. Los planos de fracturas al ser graficados se cruzan unos con otros (Fig. 25), este dato de intersección de planos fue tomado para realizar rosetas que ayudaron a identificar el movimiento del flujo subterráneo.

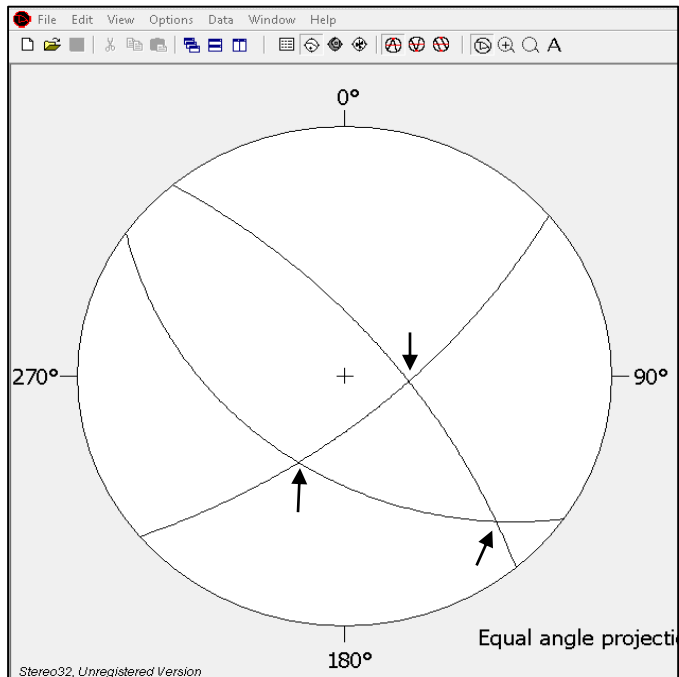


Figura 25.- Programa Stereonet 32.101. Las flechas indican el cruce de los planos de fracturas que fueron tomados para realizar las rosetas.

### 4.3.2 Procesamiento de datos de fracturas

Para concretar el análisis de porosidad por fisuración se determinó el área del círculo utilizando la fórmula matemática  $A = \pi r^2$  cuyo diámetro corresponde a 1 m. Para calcular el área de cada fractura se considera una forma elíptica o bien rectangular utilizando las fórmulas matemáticas del área de la elipse  $A = \pi \cdot a \cdot b$  donde a y b corresponden a los radios de la elipse, (a) considerado como el radio mayor que en este caso se considera como la longitud de la fractura y (b) considerado el radio menor, para este caso b corresponde con la apertura de la fractura. En caso de considerar las fracturas de forma rectangular se utiliza la fórmula del área del rectángulo  $A = l \cdot l$  donde se considera a la longitud de la fractura como el alto del rectángulo y el ancho de la figura como la apertura de la fractura. Una vez obtenidas las áreas de cada fractura en cada círculo, se suman y se realiza una regla de tres considerando como 100% el área del círculo contra el área de las fracturas. Una vez obtenido el porcentaje de cada círculo, se promedian y se obtiene el porcentaje final de porosidad por fisuración correspondiente a la unidad acuífera.

Con la longitud de las fracturas se construyeron gráficas de frecuencia en Excel para identificar cual es la medida más apta para que el fluido entre por las fracturas.

### 4.4 Levantamiento de perfiles geofísicos

Fueron seleccionadas dos zonas para realizar los levantamientos geofísicos; La zona oeste del fraccionamiento Villas del Pedregal (Perfil 1) y la parte norte de la comunidad de Capula (Perfil 2). Para ambas líneas se dispuso un arreglo electródico tipo Schlumberger con separación de electrodos de 25 m. Se inició colocando el cableado de manera que los electrodos estuvieran ordenados, para el caso del perfil 1 (Villas del Pedregal) se determinó una longitud de 2100 m (Fig. 26) y 84 electrodos, mientras que para el perfil 2 (Capula) una longitud de 1050 m y 42 electrodos (Fig. 27). Aproximadamente a 40 cm de profundidad los electrodos se introdujeron en el terreno, una vez colocados todos los electrodos se procedió a verificar las 12 conexiones del cableado. El equipo para realizar las mediciones fue el SuperSting R1, instalado al centro de cada perfil. Se inició encendiendo el generador, se conectó la consola a dos baterías y se realizó una revisión para verificar que toda la instalación estuviera funcionando correctamente; en la consola se programaron la cantidad y disposición de electrodos, la cual de manera automatizada ordenó las conexiones y comenzó la lectura de resistividades del terreno (Fig. 28). La lectura duro aproximadamente 3 horas en el perfil 1 midiendo 824 datos; el perfil 2 tuvo una duración de 1 hora leyendo 256 datos. El programa arrojó un porcentaje de error para el perfil 1 del 10%, mientras para el perfil 2 de 2% al 5%.



Figura 26.- Cableado del perfil 1 Villas del Pedregal.



Figura 27.- Perfil geofísico al norte de la localidad de Capula.



Figura 28.- Equipo SuperSting R1 que fue utilizado para realizar las mediciones en cada perfil.

#### 4.4.1 Procesado de datos de campo

El procesado de datos de campo se realizó con el software AGI Earthmager 2D en las instalaciones de CeMIE-Geo. El software maneja una técnica de inversión Smoothness-constrained inversion method. Se carga el archivo al programa, se puede realizar una limpieza de los datos para que el error del modelo sea bajo, o simplemente porque existen datos que no corresponden a valores de algún material. El programa determina cuantas iteraciones deben realizarse para la limpieza de los datos y el usuario debe manipular si agrega o quita iteraciones para que pueda realizarse una buena interpretación de los datos, considerando la resistividad de los materiales geológicos de los que se tiene noción que existen en la zona. En este caso se manipuló la información del perfil 1 debido a que tiene varios datos que caen fuera de esta gráfica de desviación estándar que fueron eliminados por causar mucho ruido en las imágenes procesadas y un error muy alto; sin embargo el porcentaje de datos eliminados no fue mayor al 5% para no causar interpretaciones erróneas o ficticias. Se cargaron los datos de altitud y distancias para adjuntar la topografía a los perfiles.

El procesado de datos proporciona tres imágenes, la primera corresponde a los datos de resistividad aparente del terreno, es decir una sumatoria de todas las resistividades de los materiales que se encuentran, la segunda es el cálculo de las resistividades aparentes y, la

tercera es la sección procesada que puede ser interpretada. Finalmente, se pueden realizar detalles de edición, como colores de capas e intervalos de resistividad.

## 4.5 Columna litológica

La columna litológica se realizó en base a las observaciones y datos recolectados en las salidas de campo; para la digitalización final se utilizó el programa Corel Draw 12. Con la herramienta "forma" se fueron delimitando los paquetes y marcando sus contactos hasta obtener la columna deseada y se agregó el color de acuerdo al mapa geológico.

## 4.6 Trabajo de laboratorio

### 4.6.1 Laminación de muestras

El trabajo de laminación de rocas se llevó a cabo en el laboratorio de preparación de muestras del Instituto de Geofísica de la UNAM, campus Morelia. Se prepararon y procesaron seis muestras de roca que fueron seleccionadas debido a que no existía información sobre dichas unidades.

Se inició con el corte de la roca utilizando la cortadora marca Buehler 10" Trim Saw + PF: 10-10003-160 (Fig. 29A) para formar testigos con medidas de 4.5 x 2.5 cm, dichos testigos fueron desbastados con abrasivos Buehler de 240, 400, 600 y 1000 micras en un vidrio, hasta que la superficie estuviera apta para ser pegada en un portaobjetos con el adhesivo marca Loctite. Después de que el pegamento seco al sol, se procedió a desbastar nuevamente con los mismos abrasivos terminando con el de 5,000, hasta observar en el microscopio que la lámina delgada estuviera lista para ser descrita. Finalmente se lavaron en un baño ultrasónico marca Cole-Parmer para eliminar restos del abrasivo (Fig. 29B).



Figura 29.- Trabajo de laminado. A) Cortado de las muestras de roca utilizando la cortadora Buehler. B) Lavado ultrasónico para eliminar restos de abrasivo.

#### 4.6.2 Petrografía

El trabajo petrográfico se realizó en el laboratorio de petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM, campus Morelia, utilizando un microscopio petrográfico marca Leica DM 2700 P (Fig. 30A). La lámina se centró en la platina para que no se moviera y utilizando los objetivos de 5X y 10X se describió su textura y características mineralógicas, con ayuda del programa LAS V4.6 se tomaron fotografías (Fig. 30B).

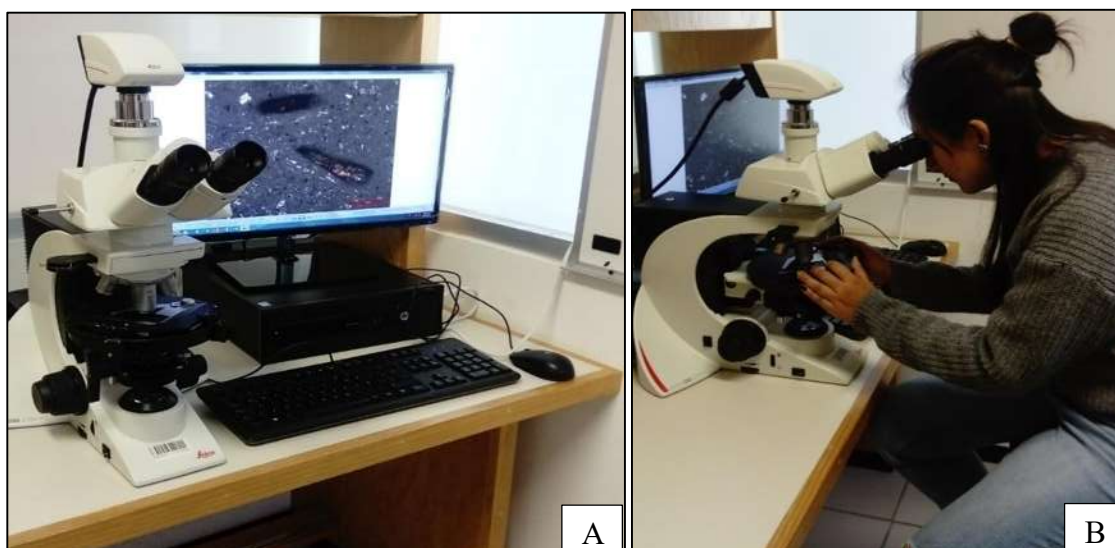


Figura 30.-Trabajo petrográfico. A) Microscopio Leica utilizado para describir las muestras de roca. B) Descripción de láminas delgadas y toma de fotografías.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Geología y estratigrafía

La zona de estudio mide aproximadamente 15.91 km de largo por 8.06 km de ancho, cubre un área de 128 km<sup>2</sup> en total. Es importante mencionar que esta zona se encuentra ampliamente construida con fraccionamientos de interés social, que continúan en construcción como es el caso del fraccionamiento Villas del Pedregal en su cuarta etapa, esto dificultó el acceso a algunos afloramientos e imposibilitó encontrar otros más.

Se identificaron 11 unidades litológicas (Ignimbrita Atécuaro, Ignimbrita El Rodeo, Dacita Itzécuaro, Secuencia fluvio-lacustre, Unidad el Águila, Unidad el Remolino, Unidad Andesítica y Conos de Escoria Concepción, Unidad Tetillas, Lava Basáltica el Divisadero, Conos de Escoria Tacécuaro y Unidad Andesita Capula) representadas en el mapa de la figura 31. El trabajo cartográfico se realizó a escala 1:20,000. Cabe recalcar que algunos de los nombres de las unidades fueron tomados de autores previos. En total se recolectaron 28 muestras de roca de las diferentes unidades, de las cuales 6 fueron analizadas de manera petrográfica por no contar con información (28 Rodeo, 2 Itzécuaro, 27 Itzécuaro, 9 Jardín, 14 Capula); los nombres de las muestras fueron asignados de acuerdo al lugar más cercano de donde fueron recolectadas y el número en el orden en que fueron colectadas. A continuación, se describen de la base a la cima las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio.

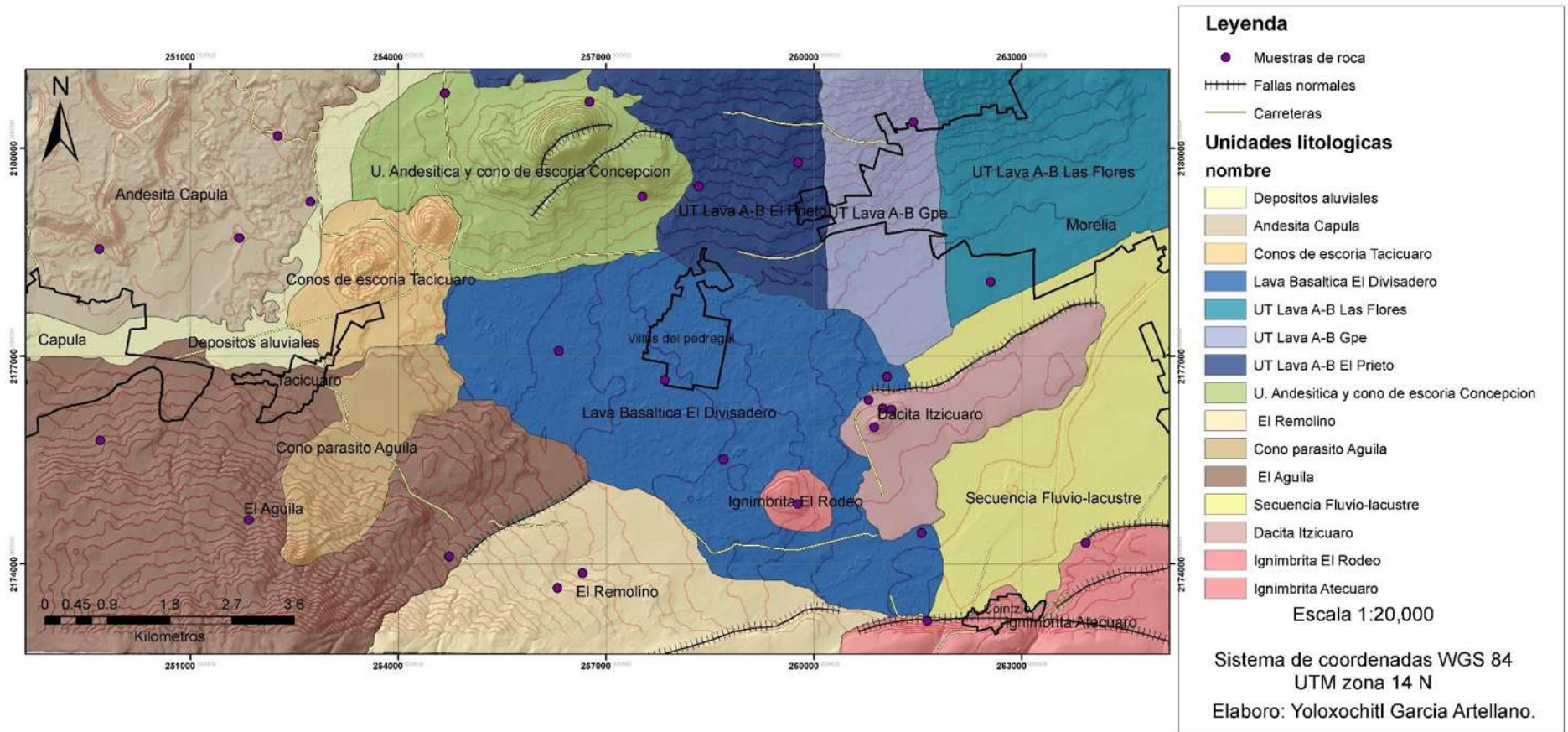


Figura 31.- Mapa geológico al poniente de Morelia, las líneas en amarillo corresponden a la red de carreteras, las líneas punteadas son las fallas que son visibles en el Modelo Digital de Elevación (MDE) y los puntos morados pertenecen a las muestras de roca recolectados en cada unidad litológica.



### 5.1.1 Ignimbrita Atécuaro Mioceno

Dentro de la zona de estudio se describieron afloramientos en la localidad de Cointzio, El Edén y Tenencia Morelos; los afloramientos son dispersos y se ubican principalmente sobre la Avenida Cointzio, cercanos al balneario Cointzio y en el camino al Edén. En el afloramiento en Cointzio de aproximadamente 20 m de largo por 3 m de alto (Fig. 32A) se observó una roca félsica de color rosa a gris con fragmentos líticos grises a rojizos de hasta 10 cm, fácilmente deleznable y poco soldada; en muestra de mano (muestra 1 Cointzio) presenta una textura afanítica compuesta por una mineralogía de fragmentos líticos color rojizo de forma anhedral en tamaños variables de 1 a 5 mm, fragmentos de pómez de 1 a 2 cm de color blanco a amarillo con textura fibrosa y algunas ocasiones alargada, cuarzo vítreo translucido a veces rellenando oquedades y feldespato potásico color gris claro (Fig. 32B). El afloramiento en la localidad El Edén (Fig.32C) presenta un color blanco a verdoso, intensamente deleznable con fragmentos de pómez blancos de hasta 2 cm; en muestra de mano (muestra 3 Edén) presenta un color blanco con textura afanítica y una mineralogía principalmente de fragmentos de pómez de 1 a 2 cm de color amarillo con textura fibrosa, formando fiamez y pequeños cuarzoes irregulares de color gris claro y blanco de 0.3 a 0.5 mm (Fig. 32D). Estas rocas fueron clasificadas como ignimbritas.

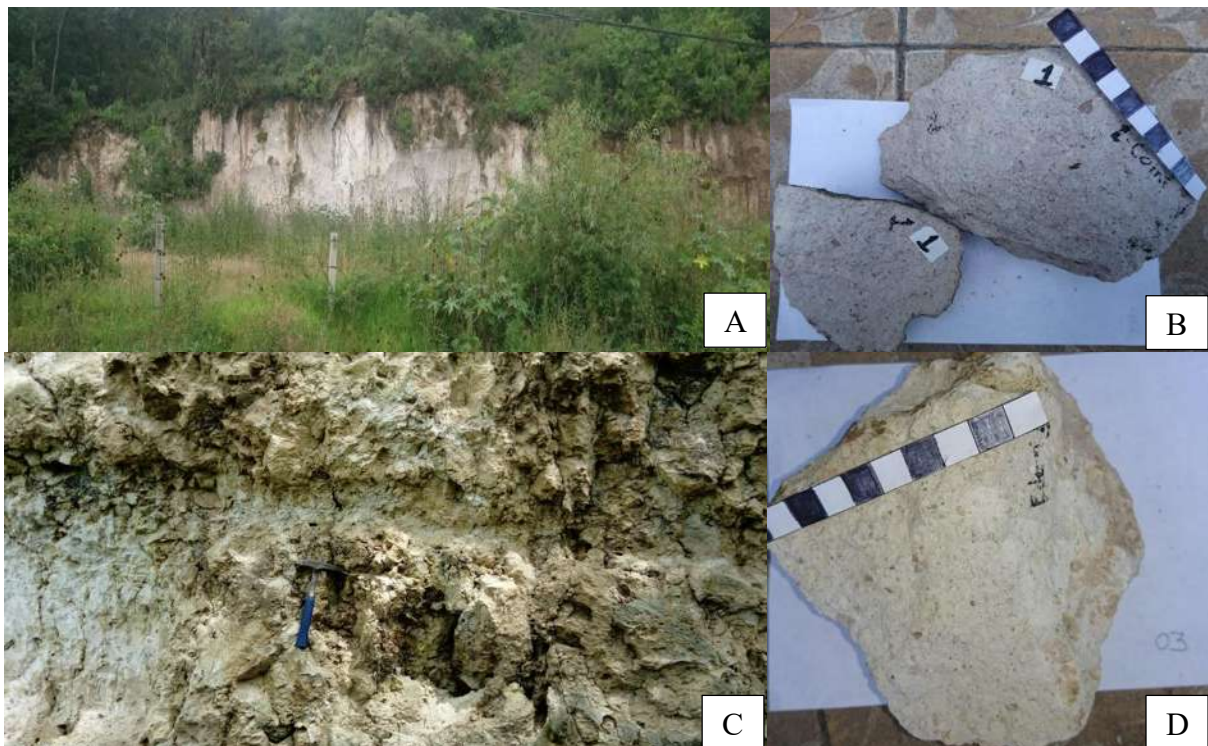


Figura 32.- Afloramientos de la Ignimbrita de Atécuaro. A) Afloramiento de la ignimbrita en la localidad de Cointzio. B) Muestra de mano tomada en la localidad de Cointzio. C) Afloramiento de la ignimbrita en la localidad El Edén. D) Muestra de mano tomada en la localidad de El Edén.

### 5.1.2 Ignimbrita El Rodeo Mioceno?

Esta unidad recibe su nombre del poblado más cercano al que se encuentra (El Rodeo-Las Praderas) y al tipo de roca descrita. Corresponde a un domo de 460 m de radio, que se encuentra al oeste de dicha comunidad, en afloramiento es una roca muy intemperizada de color gris a rosa (Fig. 33A) que cambia a color gris-verdosa. En esta unidad se tomaron dos muestras (28 Rodeo, 28A Rodeo) mineralógicamente son muy parecidas, varía el porcentaje de pómez, mayor en la muestra 28A Rodeo (Fig. 33D); las muestras de mano son félsicas, de color rosa, con textura porfídica, conformado por una mineralogía de cuarzos, líticos, fragmentos de pómez y feldespatos color gris a rosa muy claro que se rayan con navaja. En este trabajo se hace mención de dicha estructura (Domo) de acuerdo a la morfología interpretada en el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), a las curvas de nivel del mapa topográfico que reflejan una pendiente poco pronunciada y, a las observaciones realizadas durante el trabajo de campo. Mineralógicamente esta unidad y la anterior son muy similares por lo que podrían considerarse parte de la misma.

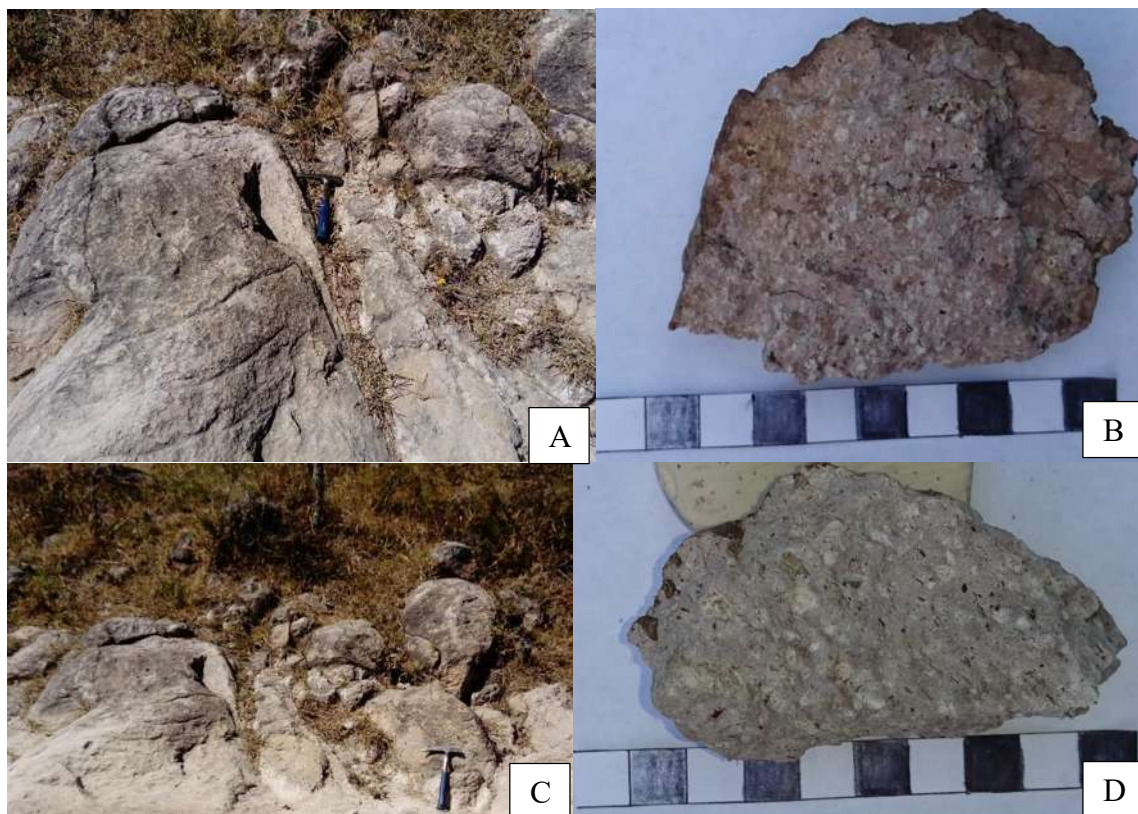


Figura 33.- A) Afloramiento de la Ignimbrita Rodeo. C) Muestra de mano 28 Rodeo. D) Afloramiento de la ignimbrita. D) Muestra de mano 28 A Rodeo.

### 5.1.3 Dacita Itzícuaró

#### Mioceno?

No existen trabajos previos que describan esta unidad, por ello en este trabajo se denominó como Dacita Itzícuaró a las rocas que afloran en el poblado de El Cerrito Itzícuaró y sobre la avenida Cointzio. Las muestras de mano (2 Itzícuaró, 27 Itzícuaró) son descritas como una roca poco soldada y muy soldada respectivamente, en ambos afloramientos su descripción mineralógica es muy similar, las rocas del cerrito son poco soldadas, de color gris, en muestra de mano son félsicas, color gris claro, de textura afanítica, con una mineralogía de hornblendas alargadas de color negro, plagioclasa color gris, líticos color café claro, poco contenido de cuarzo (Fig. 35A). El afloramiento de la avenida Cointzio parece ser un banco de materiales abandonado, mide aproximadamente 25 m de ancho por 10 m de largo (Fig. 34). Es una roca color gris a rosa muy dura, muy soldada; en muestra de mano tiene una textura fanerítica (Fig.35B) una mineralogía de hornblendas alargadas de color café en diferentes tamaños desde pocos mm hasta 0.5 mm, líticos de 1 cm y como mineral secundario pirolusita (Figura 35 C).



Figura 34.- Afloramiento de la Dacita Itzícuaró ubicado sobre la avenida Cointzio. Mide aproximadamente 25 m de ancho por 10 m de largo.

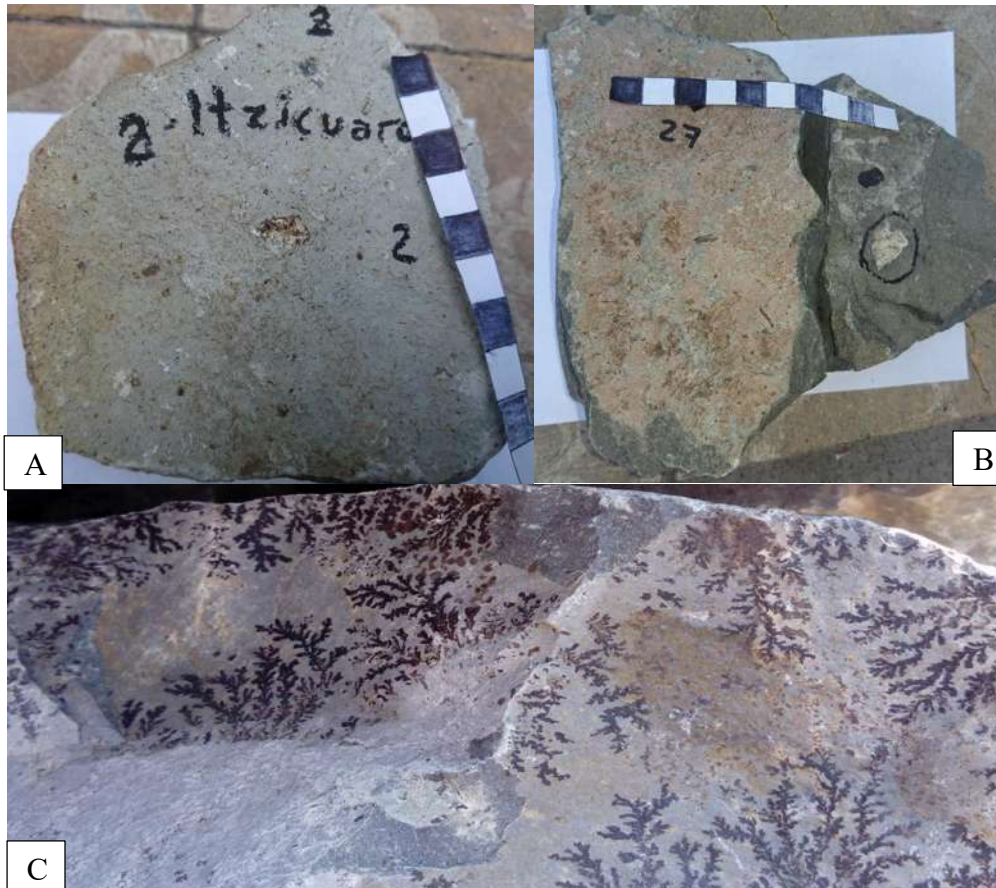


Figura 35.- Muestras de mano de la dacita Itzicuaró. A) Muestra del Cerro Itzicuaró donde se aprecian las hornblendas? y los líticos. B) Muestra del afloramiento sobre la avenida Cointzio donde se aprecian los líticos de gran tamaño. C) Pirolusita encontrada en las muestras de mano, formado como mineral secundario.

#### 5.1.4 Secuencia fluvio-lacustre Mioceno-Plioceno

En este trabajo se retoma el nombre de unidad fluvio-lacustre a la secuencia que sobreyace a la ignimbrita. Aunque no se encontró en superficie, se interpreta por la morfología del terreno, la interpretación del MDE y la información con la que se cuenta de los pozos Mintzita y Crisoba ubicados el norte de Cointzio. El pozo Mintzita hace referencia en los primeros 15 m a rocas volcánicas cortando hasta 95 m de material semicompacto y roca fracturada permeable. El pozo Crisoba describe 1.8 m de suelo, hasta 21.3 m de tobas arcillo-arenosas y a partir de ahí hasta 200 m de tobas arenosas.

### 5.1.5 Unidad El Águila Pleistoceno Temprano

La unidad el Águila aflora al sur de Capula, sur de Tacícuaro y Cuanajillo Grande, donde se describen afloramientos extensos de rocas máficas de color gris con pocas vesículas (Fig.36A); afloramientos masivos y algunos con vesículas distribuidas por todo el afloramiento (Fig. 36B) y; afloramientos extensos con la forma típica de las lavas (Fig. 36C). Sobre esta unidad fue posible obtener tres muestras de roca (18 Tacícuaro, 19 Sur de Capula y 24 Cuanajillo), la primer muestra (Fig. 37A) corresponde a una roca máfica, de vesículas proporcionales de textura afanítica con una mineralogía poco visible pero identificable de minerales color verde claro clasificados como piroxenos y muy poco contenido de olivinos; la muestra 19 Sur de Capula (Fig. 37B) es una roca máfica de textura afanítica, con vesículas grandes y pequeñas pero no se llegan a conectar, presenta una mineralogía de plagioclasas color blanco de forma tabular y piroxenos color verde claro, la última muestra 24 Cuanajillo (Fig. 37C) es una roca máfica de color gris con vesículas muy pequeñas (milimétricas) y redondeadas conformada por una mineralogía de piroxenos color amarillo pero casi imperceptibles a vista de lupa. Aunque la clasificación petrográfica es difícil de lograr con muestras donde la mineralogía es difícil de visualizar, dicha asociación mineralógica permitió clasificar a las rocas como andesitas y andesitas-basálticas. Dentro de esta unidad se identificó un cono parásito que fue delimitado junto a su flujo, este afloramiento corresponde a una roca máfica de vesículas grandes (Fig. 36D) pero mineralógicamente similar a las demás muestras de roca con piroxenos verdes.

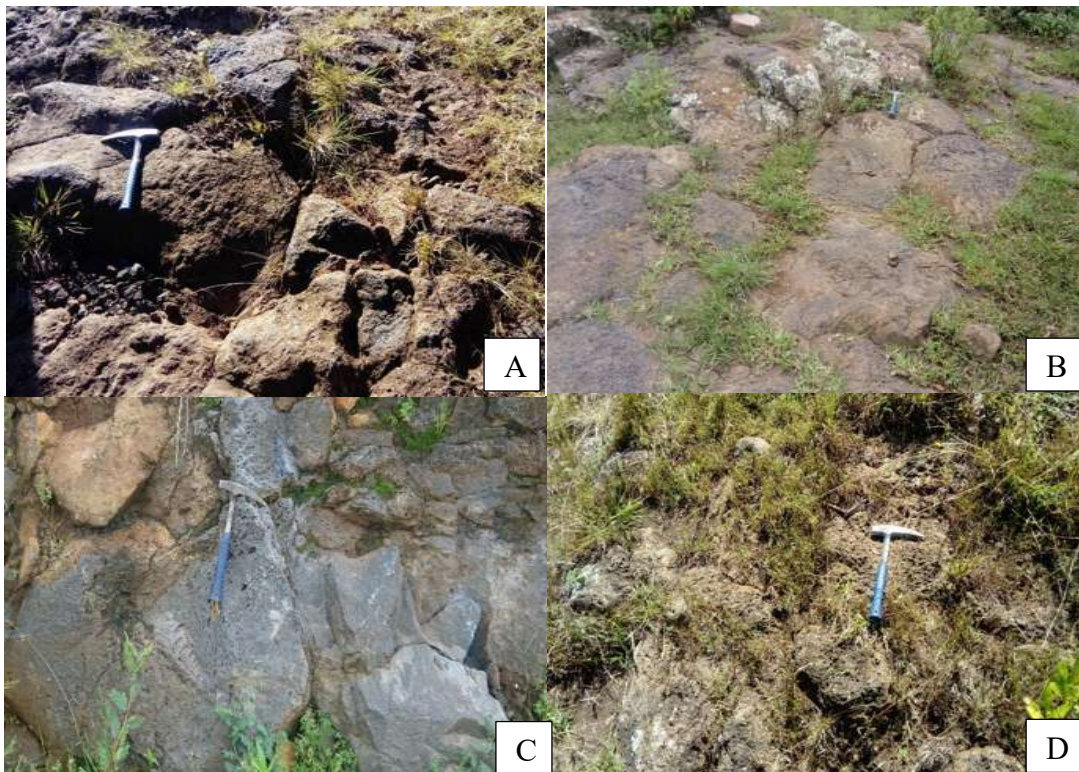


Figura 36.- Afloramientos de la unidad El Águila. A) Ubicado en la localidad al Sur de Capula B) Afloramiento ubicado al sur del poblado Tacícuaro. C) Afloramiento ubicado cerca de la iglesia del poblado Cuanajillo. D) Afloramiento correspondiente al cono parasito del Águila.



Figura 37.- Muestras de mano de la unidad el Águila. A) Muestra 18 Tacícuaro. B) Muestra 19 Sur de Capula. C) Muestra 24 Cuanajillo.

### 5.1.6 Unidad El Remolino

#### Pleistoceno Medio

La unidad el remolino aflora donde se asienta el poblado de San Nicolás Obispo, ahí afloran rocas máficas de color gris claro, con vesículas grandes y pequeñas (Fig. 38A). Dos muestras de mano fueron descritas sobre esa unidad; la muestra 16 San Nico presenta vesículas grandes de hasta 1 cm (Fig. 38B) una textura afanítica y una mineralogía de piroxenos color verde claro inmersos en una matriz vítrea no distinguible con lupa, en comparación con la muestra 17 San Nico de vesículas pequeñas y muy cerradas (Fig. 38C) con textura afanítica y una asociación mineralógica conformada por plagioclasa y piroxenos de color miel, esta mineralogía permite clasificarlas como andesitas.



Figura 38.- Afloramiento de la unidad El Remolino. A) Afloramiento al sur de San Nicolás Obispo. B) Muestra 16 San Nico correspondiente a la unidad El Remolino. C) Muestra 17 San Nico correspondiente a la unidad El Remolino.

### 5.1.7 Unidad andesítica y conos de escoria Concepción Pleistoceno Medio

Se ubica al norte de los fraccionamientos Lomas de la Maestranza, Huertos Agua Azul, Jardín de la Montaña y al oeste del poblado La Concepción en donde se ubica un cono en el que se describen capas estratigráficas de escorias y fragmentos andesíticos. En esta unidad fueron colectadas tres muestras de rocas (9 Jardín, 10 Concha, 11 carretera a Cuto) recolectadas en el fraccionamiento Jardín de la Montaña, cerca de la Concepción y en la carretera hacia Cuto de la Esperanza. El afloramiento en el fraccionamiento Jardín de la Montaña tiene una longitud aproximada de 15 m de ancho por 6 de largo, son rocas color rojizo a gris, máficas, masivas sin presentar vesículas (Fig.39A); en muestra de mano son rocas de color gris, masivas de textura afanítica con una mineralogía de piroxenos color verde

claro, inmersos en una matriz oscura (Fig. 39B). El siguiente punto ubicado al oeste de la Concepción corresponde a una afloramiento de capas estratigráficas con escorias muy vesiculadas de color rojizo (Fig. 40A); en muestra de mano son masivas sin vesículas, máficas de textura afanítica con una mineralogía de piroxenos color verde claro y color miel inmersos en una matriz muy fina imperceptible a la lupa (Fig. 40B). El último afloramiento ubicado en la carretera hacia Cuto, es una roca gris, masiva, de aproximadamente 4 m de largo por 1.5 m de ancho, (Fig. 41A) la muestra de mano es masiva, con textura afanítica y una mineralogía de piroxenos verde oscuro a verde claro, algunos de forma tabular inmersos en una matriz fina en la cual no se distinguen minerales (Fig. 41B). La asociación mineralógica de las muestras permitió clasificarlas como andesitas.

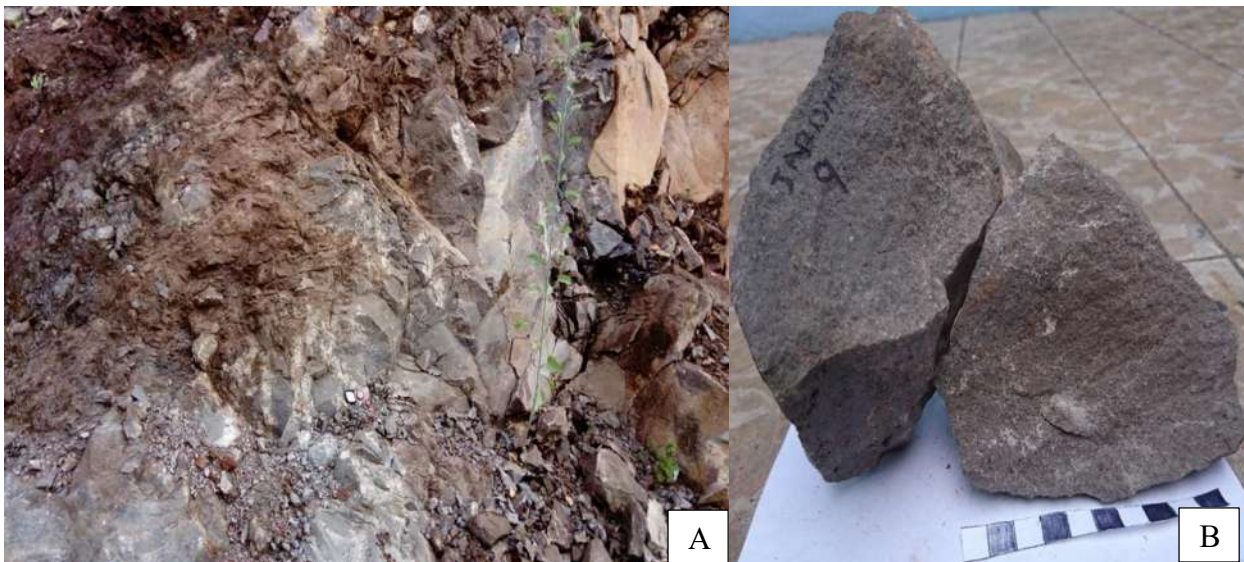


Figura 39.- Afloramiento de la unidad andesítica y conos de escoria Concepción ubicado en el fraccionamiento Jardín de la Montaña B) Muestra de mano del mismo fraccionamiento.





Figura 40.- A) Afloramiento de la unidad andesítica y conos de escoria Concepción ubicado al Oeste de la Concepción. B) Muestra de mano de escoria y andesita al Oeste de la Concepción.



Figura 41.- A) Afloramiento de la unidad andesítica y conos de escoria Concepción localizado en la carretera hacia Cuto de la Esperanza. B) Muestra de mano tomada de ese afloramiento.

### 5.1.8 Unidad Tetillas Pleistoceno Medio

Se denomina como Unidad Tetillas a todas las lavas que componen al volcán en escudo del mismo nombre. La unidad Tetillas aflora al oeste de Morelia, al este de la Concepción, en la localidad San Isidro Itzúcuaro, fraccionamientos Villas de la Loma, Arco San Juan, colonia la Palma, entre otros. Dentro de esta unidad fueron recolectadas 4 muestras de roca (5 Nubes, 6 E-Concepción, 7 Mor, 8 Hacienda). Los afloramientos son escasos debido a que la zona se encuentra más construida que como lo muestran los mapas del INEGI. Un afloramiento ubicado dentro del fraccionamiento Campo Nubes presenta lavas máficas masivas y en otra proporción vesiculadas (Fig. 42A); la muestra de mano de este sector es una roca con vesículas pequeñas, máfica, de color gris con una mineralogía de olivinos, piroxenos inmersos en una matriz fina (Fig. 42B). El afloramiento al este de la Concepción (Fig. 43A) presenta pocas vesículas; en muestra de mano es una roca de textura afanítica con una mineralogía conformada por plagioclasas, olivinos y piroxenos (Fig. 43B). El afloramiento dentro de la ciudad de Morelia al norte, es un afloramiento masivo (Fig. 44A) al igual que la muestra de mano (Fig. 44B) de textura afanítica con una mineralogía de piroxenos, olivinos, plagioclasas inmersas en una matriz vítrea. El último afloramiento de esta unidad es descrito en el fraccionamiento Hacienda donde se encuentran rocas masivas, máficas, (Fig. 45A) de textura afanítica con una mineralogía de olivinos verde claro, piroxenos color miel y plagioclasas inmersos en un fondo vítreo (Fig. 45B); estas rocas por su mineralogía son clasificadas como andesitas basálticas.

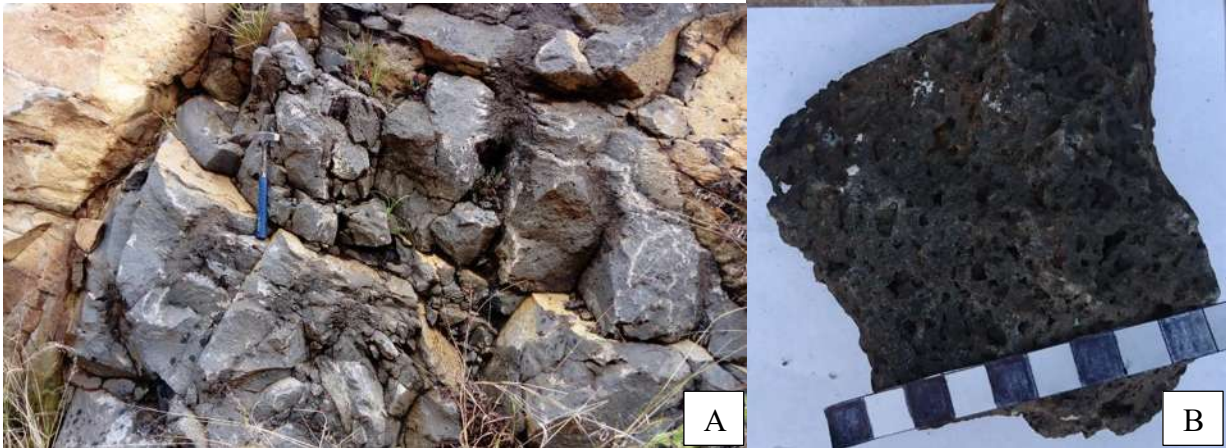


Figura 42.- A) Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado en el fraccionamiento Campo Nubes. B) Muestra de mano recolectada en el mismo fraccionamiento.

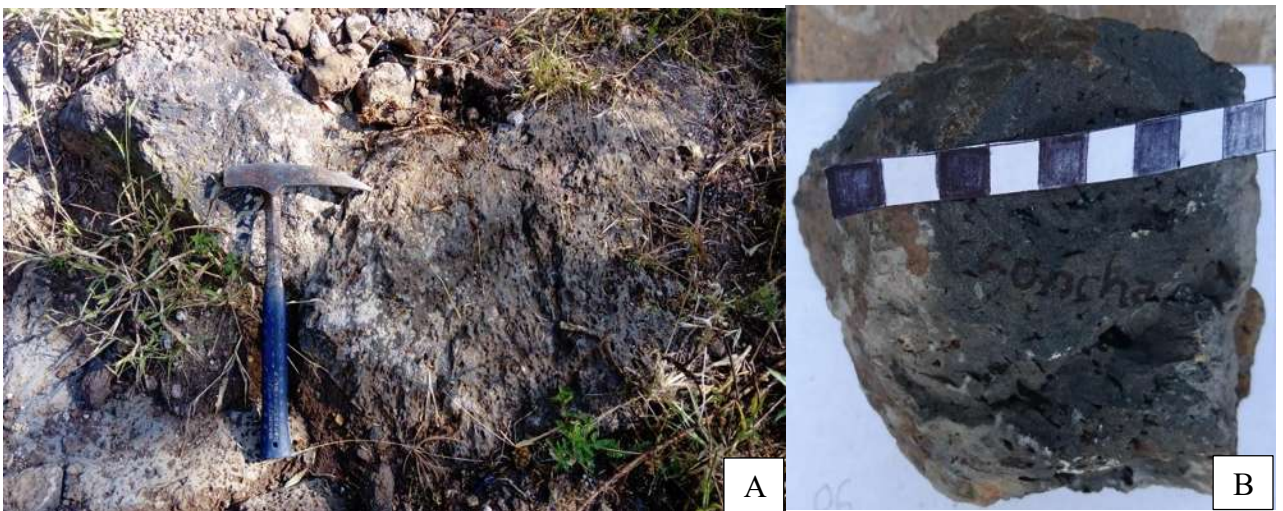


Figura 43.- A) Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado al este de la Concepción. B) Muestra de mano recolectada en el mismo poblado.



Figura 44.- A) Afloramiento de la unidad Tetillas ubicado al norte de Morelia. B) Muestra de mano del mismo lugar.



Figura 45.- A) Afloramiento de la unidad Tetillas en el fraccionamiento Hacienda que se ubica dentro de la ciudad de Morelia. B) Muestra de mano recolectada en el mismo lugar.

### 5.1.9 Lava Basáltica el Divisadero Pleistoceno Tardío

Aflora en los fraccionamientos Villas del Pedregal, Villa Magna, La Hacienda y la localidad de la Mintzita. (Fig. 46). Los afloramientos de esta zona son rocas máficas de color gris, muy vesiculadas, de textura afanítica a porfídica, presentan una mineralogía compuesta de olivinos color verde claro, piroxenos color miel, ambos de forma anhedral, inmersos en una matriz fina. Dentro de esta unidad fueron recolectadas 5 muestras de roca (20 Villa Magna, 21 Villas, 22 Mintzita, 23 Villas 2, 25 Rodeo), de manera general en base a su mineralogía se clasifican como rocas basálticas. La muestra 20 Villa Magna es una roca máfica de color gris con textura afanítica, con vesículas y una mineralogía de olivinos verde claro, plagioclasas color blanco, algunas grises o translucidas que son rayadas con navaja y

en menor cantidad piroxenos color verde claro (Fig. 47A). La muestra 21 Villas es una roca de textura fanerítica, con vesículas grandes y pequeñas con una mineralogía que se nota a simple vista, olivinos verde claro, piroxenos color ámbar o verde y plagioclasas translucidas que se rayan con navaja (Fig. 47B). La muestra 22 Mintzita es una roca que a excepción de las demás no presenta vesículas, es masiva, de color gris con textura afanítica, con una mineralogía de olivinos y escasos piroxenos color verde (Fig. 47C). La muestra 23 Villas 2 es una roca de textura porfídica con minerales pequeños y grandes, vesiculada, presenta una mineralogía muy notable a simple vista, compuesta por olivinos color verde claro de 0.2 a 8 mm, piroxenos y plagioclasas translucidas que se rayan con navaja (Fig. 47D). La última muestra de esta unidad (25 Rodeo) se caracteriza por presentar una textura porfídica, con vesículas grandes y pequeñas con una mineralogía de olivinos color verde claro, plagioclasas translucidas que se rayan con navaja y algunos piroxenos (Fig. 47E).

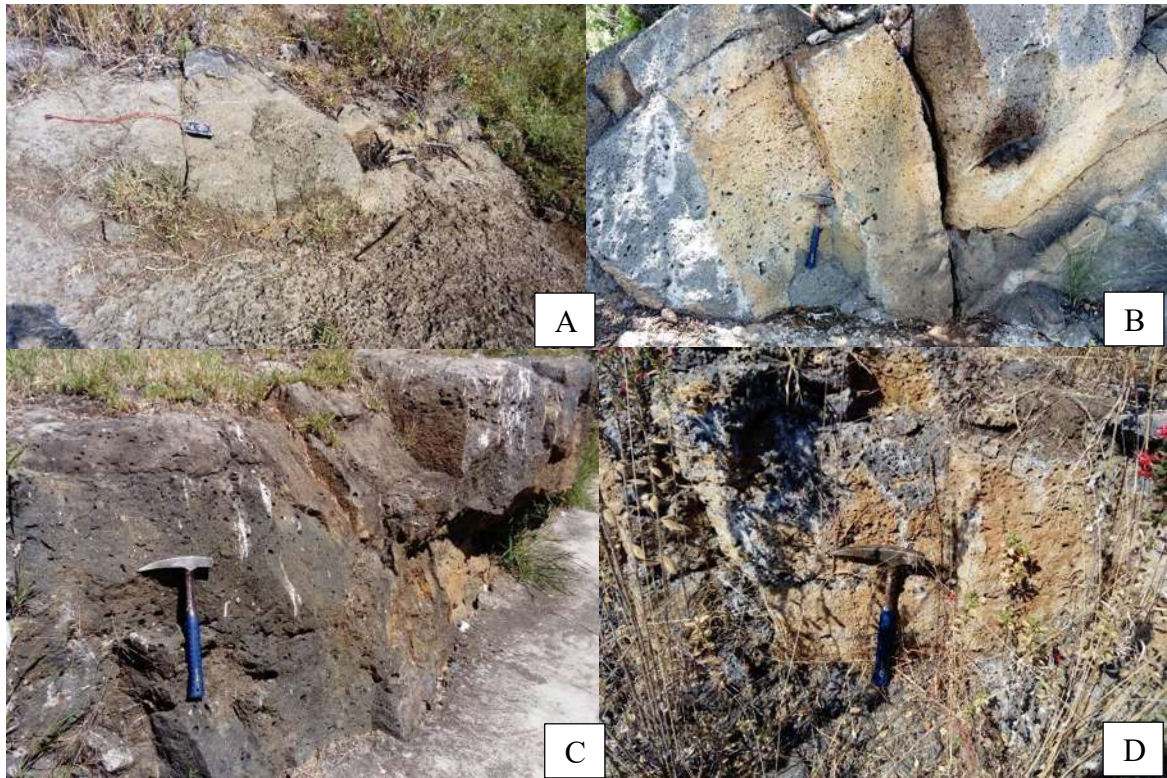


Figura 46.- Afloramientos de la Unidad Lava Basáltica el Divisadero. A) Afloramiento ubicado en el fraccionamiento Villas del Pedregal. B) Afloramiento en el fraccionamiento Villa Magna. C) Afloramiento en el fraccionamiento La Hacienda. D) Afloramiento en la zona del Rodeo-Las Praderas.

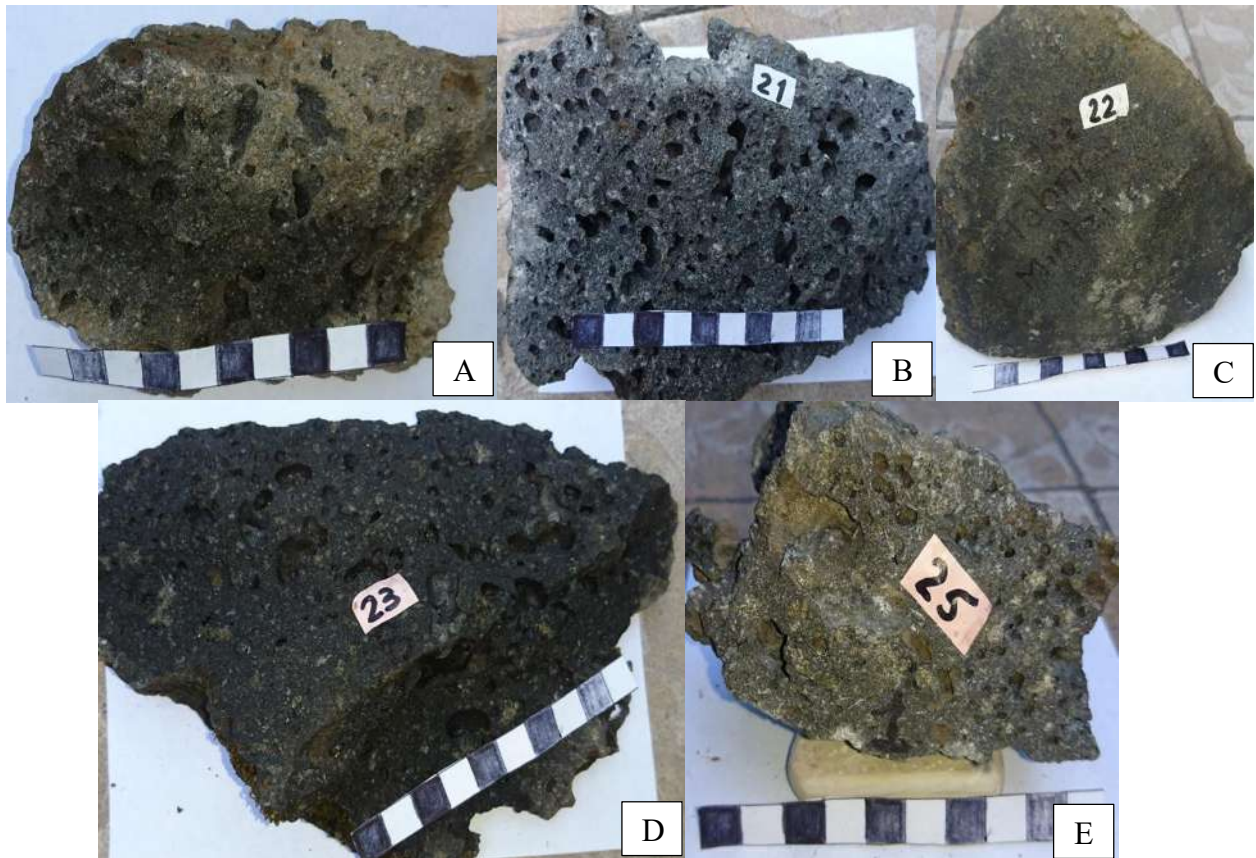


Figura 47.- Muestras de mano de la unidad basáltica El Divisadero. A) Muestra de mano de la zona de Villa Magna. B) Muestra de mano del fraccionamiento Villas del Pedregal. C) Muestra de roca de la zona cercana a la Mintzita. D) Muestra de mano del fraccionamiento Villas del Pedregal por la parte más lejana a la construcción. E) Muestra recolectada cercana al poblado El Rodeo.

#### **5.1.10 Conos de escoria Tacúcuaro Pleistoceno Tardío-Holoceno**

Esta unidad aflora hacia la zona norte de Tacúcuaro, incluye la zona donde se ubica el tiradero municipal y la comunidad de Cerritos. Afloran dos conos de escoria que son aprovechados como zonas de bancos de arena. Las pocas rocas que pudieron ser recolectadas en esta unidad presentan un color rojizo, son rocas muy ligeras y presentan múltiples vesículas, por lo que se clasifican como escorias. Las zonas más bajas ubicadas alrededor de los conos son de composición más basáltica, aunque no fue posible contar con muestras para su descripción petrológica debido a que no se encontraron afloramientos disponibles.

### 5.1.11 Unidad Andesítica Capula Pleistoceno Tardío-Holoceno

La unidad más joven de este trabajo es la que aflora al norte de Capula (Fig. 48A) y al sur de la comunidad Joyitas (Fig. 48B). Escasos afloramientos de esta unidad fueron descritos al Norte de Capula y en la carretera hacia la comunidad de Joyitas donde se evidencia un afloramiento de color gris, con presencia de vesículas pequeñas y muy cerradas, aunque hacia la zona norte de Capula la roca es masiva. Sobre esta unidad fueron recolectadas 4 muestras de roca. (12 Capula1, 13 Capula2, 14 Capula norte, 15 Joyitas) (Fig. 49). Todas las rocas de esta unidad son máficas, de color gris con vesículas muy pequeñas y cerradas, de textura afanítica, presentan una mineralogía de piroxenos color verde claro algunos de color miel, plagioclasas color blanco, inmersos en una matriz fina, que fue un poco difícil de identificar por el tamaño; por el contenido mineralógico son clasificadas como andesitas.

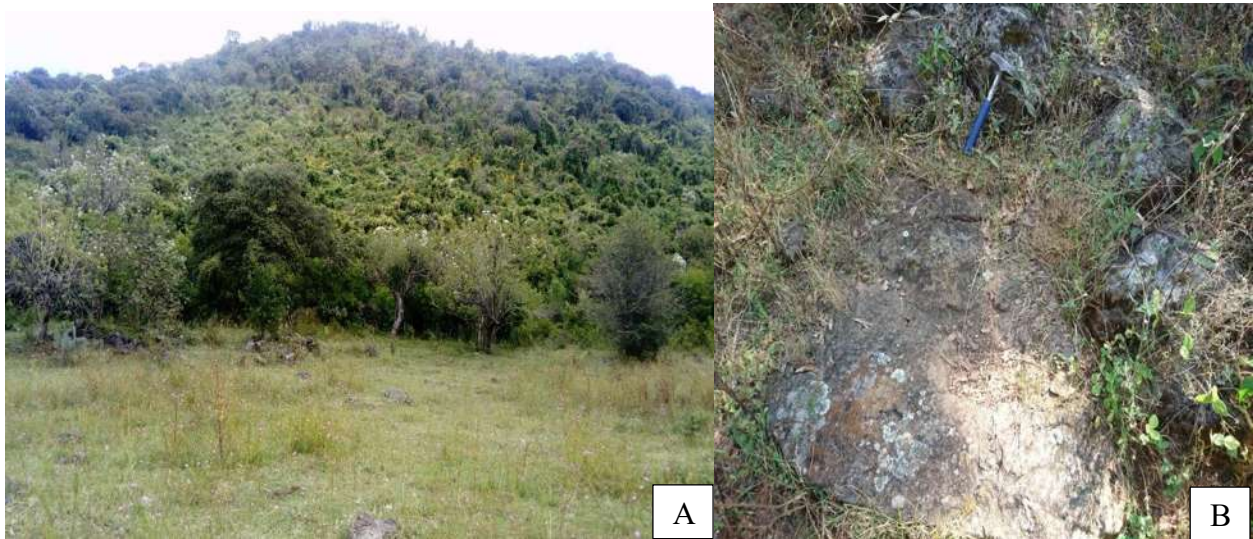


Figura 48.- Afloramientos de la Unidad Andesítica Capula. A) Afloramiento ubicado al norte de Capula, con vista hacia el norte en dirección al poblado Joyitas. B) Afloramiento ubicado en la carretera hacia Joyitas.

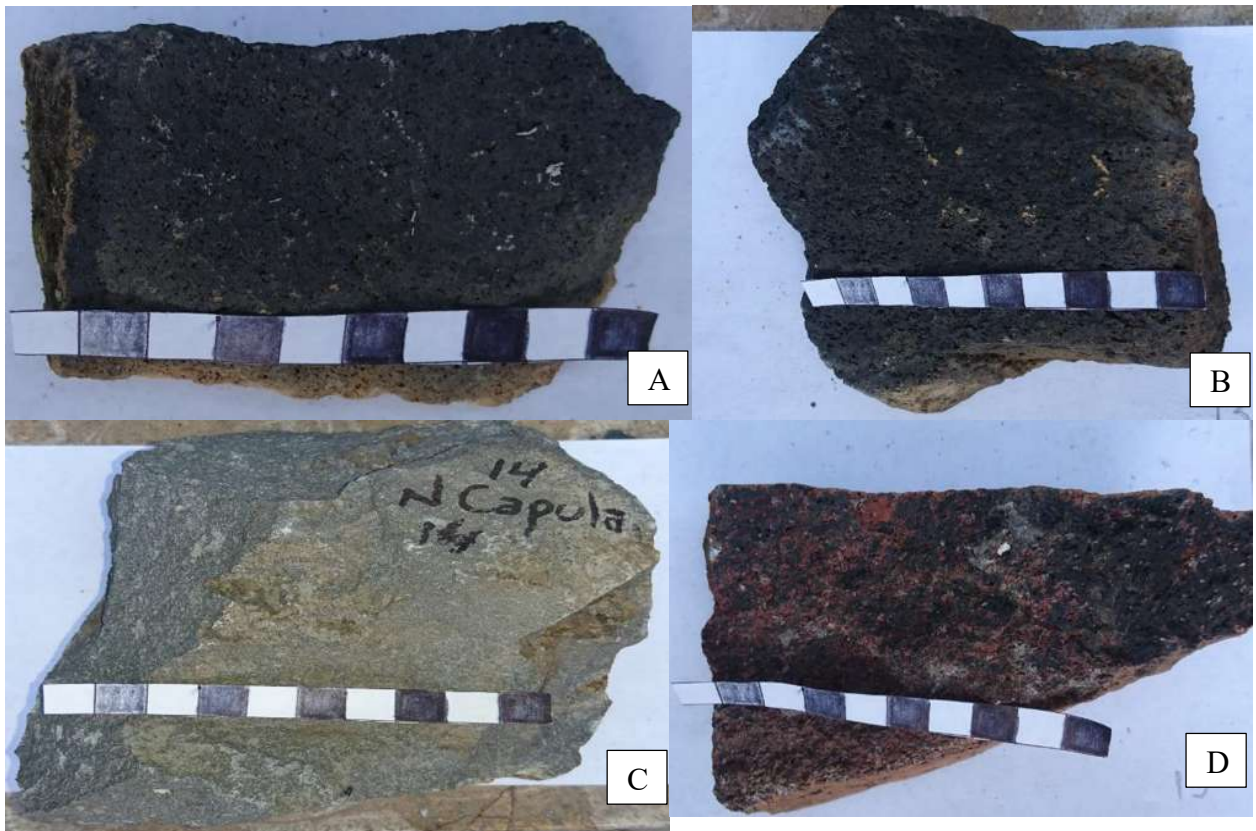


Figura 49.- Muestras de roca de la Unidad Andesítica Capula. A) Muestra 12 Capula1. B) Muestra 13 Capula2. C) 14 Capula Norte. D) Muestra 15 Joyitas.

## 5.2 Columna tipo del área Morelia-Capula

La figura 50 muestra la columna tipo del área Morelia-Capula que fue generada en base a las observaciones y descripción de las unidades anteriormente mencionadas.

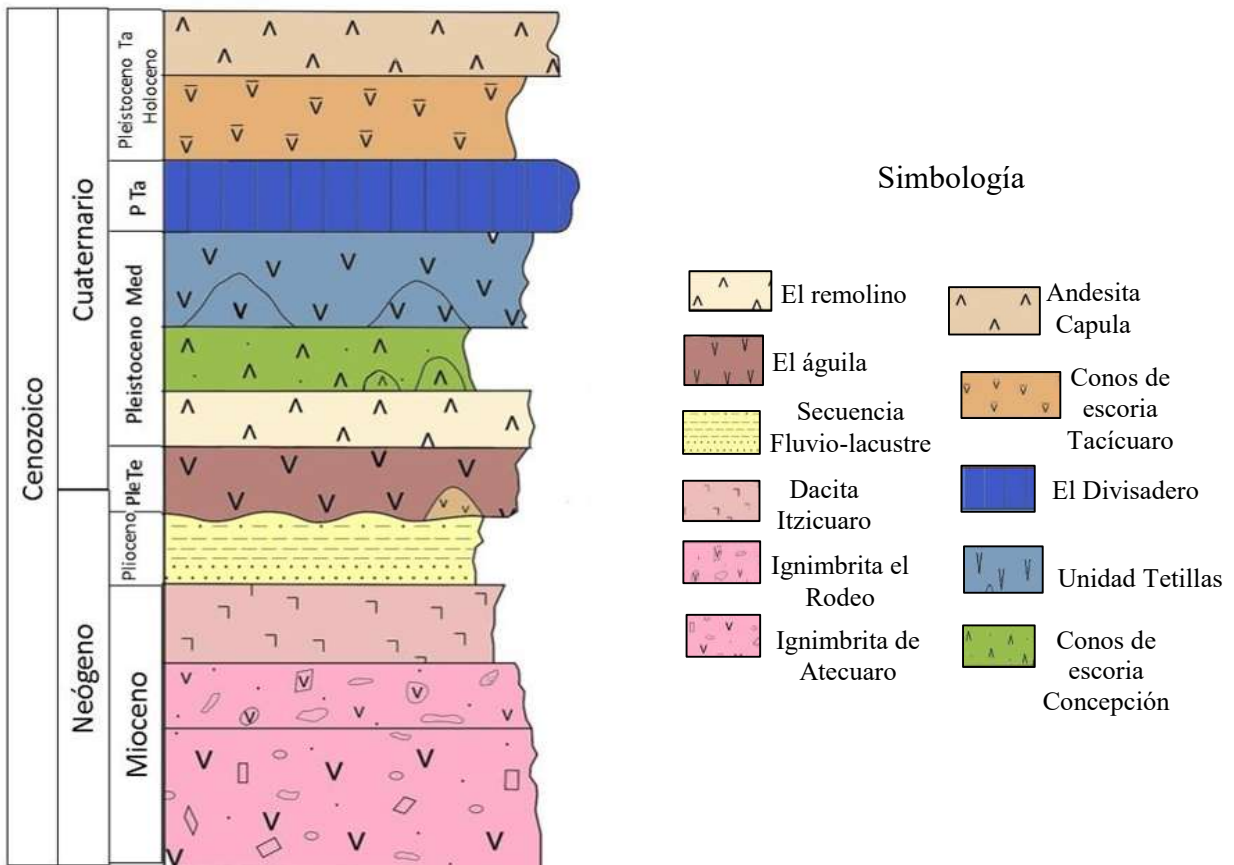


Figura 50.- Columna tipo del área de estudio.



## 5.3 Petrografía

### 5.3.1 Ignimbrita El Rodeo

De esta unidad fueron analizadas dos láminas delgadas (Muestra 28 Rodeo y 28 A Rodeo) aunque fueron tomadas del mismo lugar, se consideraron por el contenido de pómez (mayor en la muestra 28 A Rodeo). Ambas presentan una textura vesicular en general, ya que hay pequeñas cavidades esféricas o tabulares que se forman por el escape de burbujas de vapor de agua y otros gases; presenta una mineralogía de cuarzos que se presentan generalmente como cristales aislados y rotos de forma subhedral en tamaños de hasta 4  $\mu\text{m}$  (Fig. 51A) que en ocasiones llegan a formar texturas esferulíticas (Fig. 51B). Se encontró un cristal de sanidino, mineral característico de este tipo de rocas (Fig. 51C), los feldespatos tienen tamaño de hasta 3  $\mu\text{m}$  de forma subhedral a anhedral, algunos de ellos con textura de tamiz lo cual indica que están siendo reemplazados por arcillas (Fig. 51D), presentan bordes desgastados, el vidrio que se encuentra uniformemente en toda la lámina forma estructuras bandeadas de color café (Fig. 51E), lo que permite inferir un grado de soldamiento en la roca, a mayor detalle (10X) es visible una textura esferulítica dentro del vidrio (Fig. 51F).

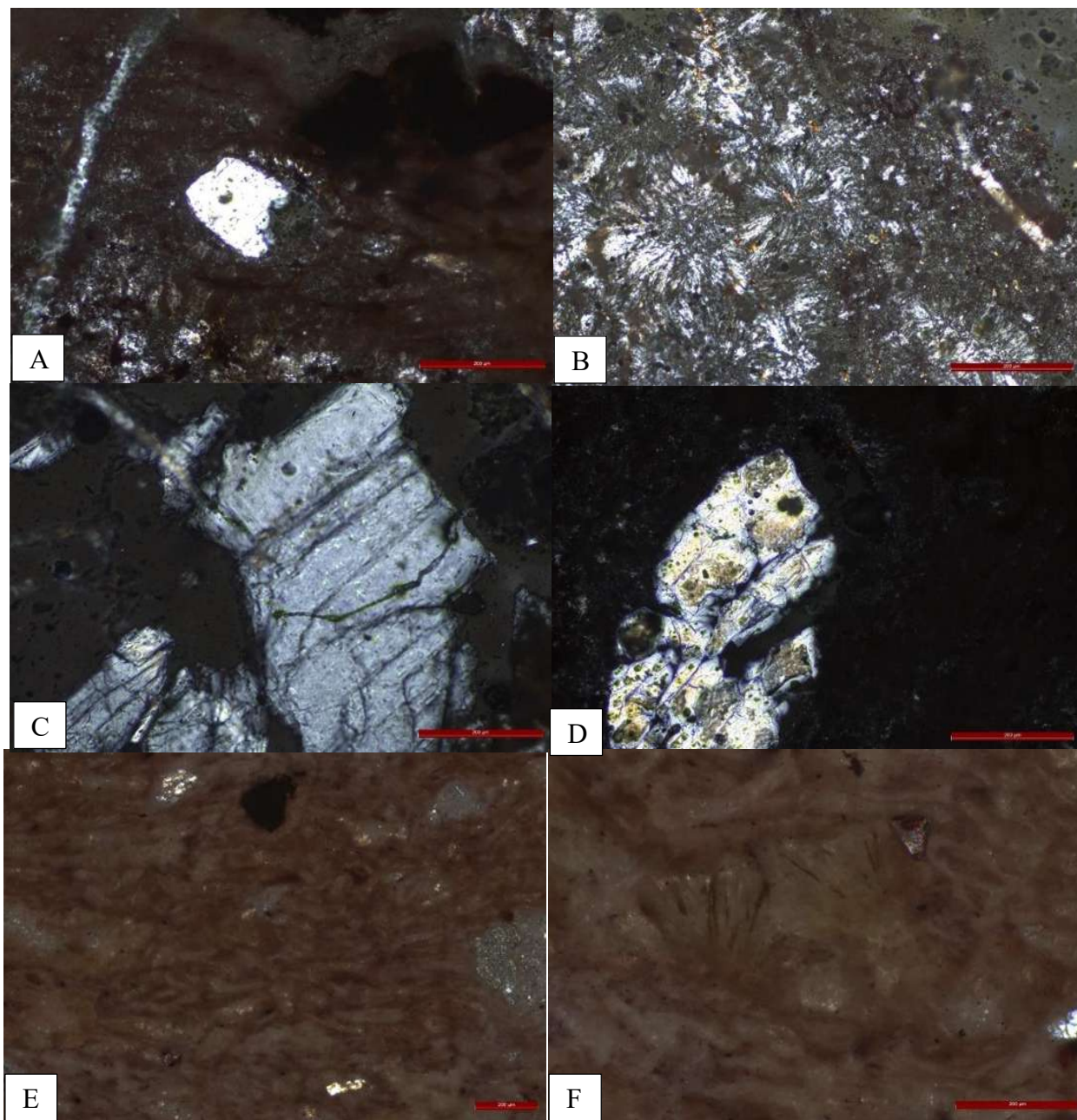


Figura 51.- Microfotografías de las secciones delgadas de la Unidad Ignimbrita Rodeo. A) Cuarzos de forma subhedral. B) Textura esferulítica que forman los cuarzoes. C) Sanidino, mineral característico en este tipo de rocas. D) Feldespato potásico con textura de tamiz. E) Vidrio volcánico alojado en toda la lámina delgada. F) Textura esferulítica que forma el vidrio.

### 5.3.2 Dacita Itzícuarro

De esta unidad fueron analizadas petrográficamente la muestra 27 Itzícuarro y 2-Itzícuarro. Ambas muestras presentan una mineralogía similar sin embargo presentan algunas características que las distinguen. La primera (2-Itzícuarro) es una roca de textura porfídica (Fig. 52A) con una mineralogía de plagioclasas microlíticas con maclado tipo albita, de tamaño de 1  $\mu\text{m}$ , inmersas en una matriz vítrea color café de aspecto terroso con fenocristales de anfíbol (Hornblenda) de forma euhedral tabulares y pocas rómbicas color negro a café muy oscuro (Fig. 52B) dispuestos en toda la sección delgada, algunos oxidados y reemplazados por pirolusita, algunas dejadas solo como relictos de hornblenda (Fig. 52C) que no han sido totalmente reemplazadas de color café claro en nicols paralelos, muy poco contenido de cuarzos aproximadamente un 5% de tamaño del orden de 0.5  $\mu\text{m}$  que no fue posible fotografiar y la presencia de un solo piroxeno roto con su característico crucero y color café (Fig. 52D).

La muestra (27 Itzícuarro) es una roca muy soldada, presenta una textura pilotaxítica (las plagioclasas se observan orientadas en la dirección del flujo) (Fig.53A) con microfenocristales de anfíboles de distintos tamaños, lo que podría evidenciar una incipiente textura porfídica (Fig. 53B); la mineralogía está compuesta por plagioclasas de forma euhedral con maclado tipo albita, en tamaños que varían desde 1  $\mu\text{m}$  hasta 3  $\mu\text{m}$ , anfíboles clasificados como hornblendas, de formas alargadas y rómbica característica de este mineral, se llegan a encontrar como relictos (Fig. 53C) y parcialmente oxidadas o reemplazadas (Fig. 53D), estos minerales inmersos en una matriz vítrea de color café con aspecto terroso. Por su mineralogía estas rocas se clasifican como dacitas.

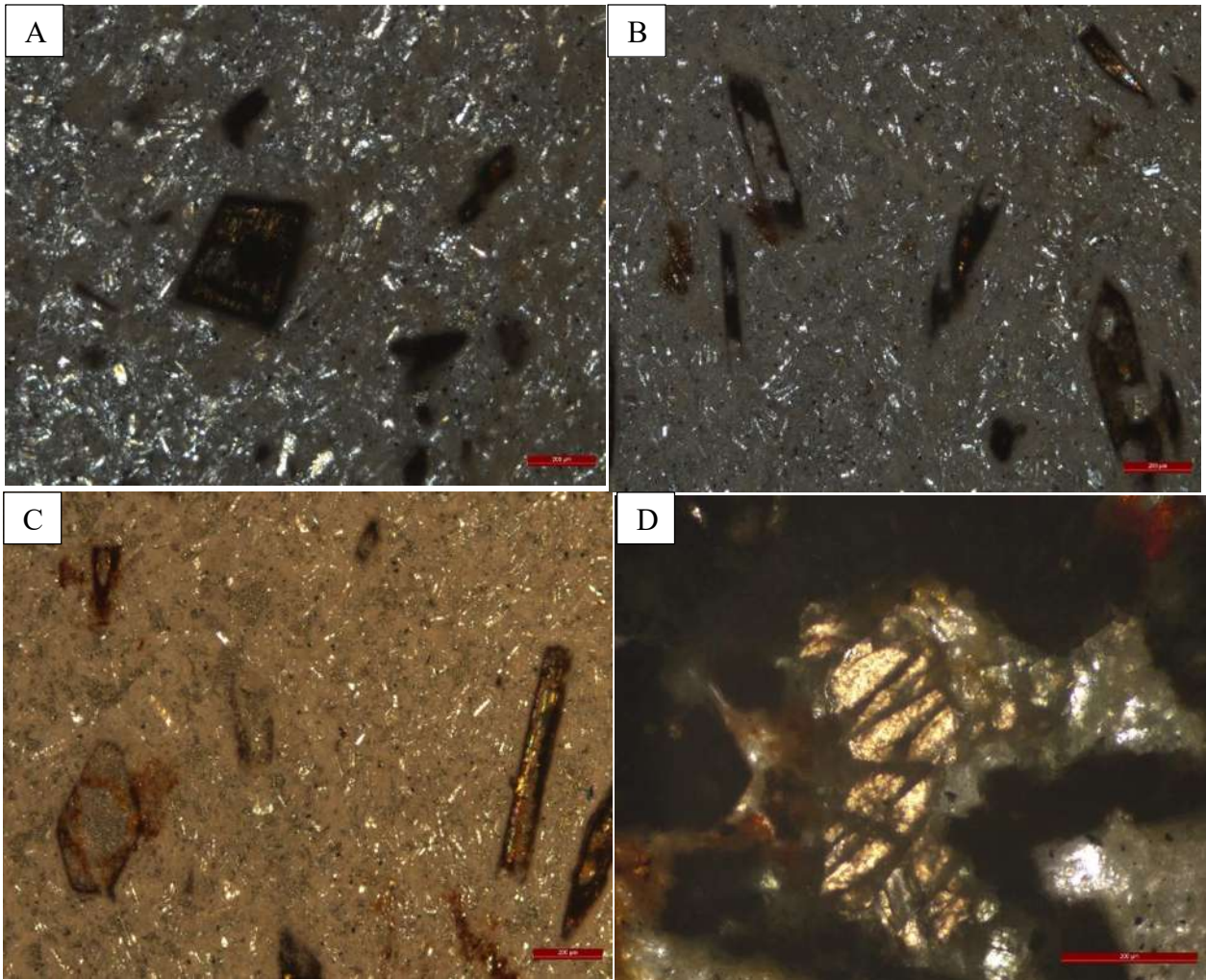


Figura 52.- Microfotografías de la Unidad Dacita Itzícuaru, muestra 2-Itzícuaru. A) Textura porfídica donde se observan los fenocristales de hornblenda inmersos en una matriz de plagioclasas B) Las hornblendas se observan parcialmente remplazadas, en una matriz de plagioclasas microlíticas. C) Hornblendas de forma tabular y rómbica que han sido parcialmente reemplazadas y dejadas como relictos. D) fragmento del único piroxeno que fue encontrado en la muestra.

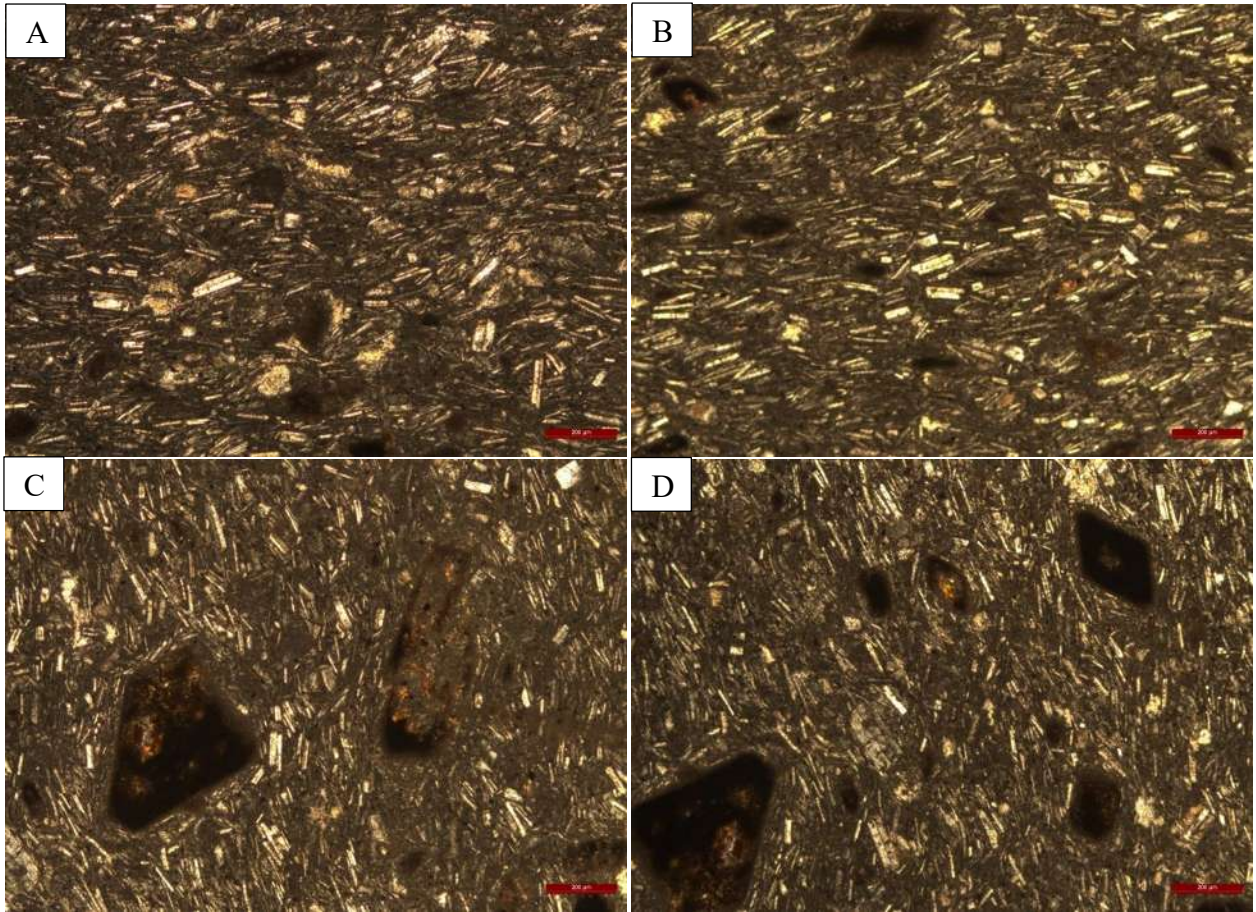


Figura 53.- Microfotografías de la Unidad Dacita Itzicuaru, muestra 27 Itzicuaru. A) Textura pilotaxítica donde se observa la orientación de las plagioclasas. B) Textura porfídica, los piroxenos funcionan como microfenocristales inmersos en una matriz de plagioclasas. C) Hornblendas de forma tabular y rómbica que han sido parcialmente desgastada. D) Hornblendas de forma rómbica que han sido reemplazada por pirolusita.

### 5.3.3 Unidad Andesítica y Conos de Escoria Concepción

Fue seleccionada la muestra 9 Jardín, la cual se identificó con una textura porfídica (Fig. 54A) ya que los piroxenos y clinopiroxenos se encuentran como fenocristales y microfenocristales sobre una matriz de plagioclasas; también se identificó una textura pilotaxítica (Fig. 54B) ya que en algunas partes de la sección delgada es posible observar la orientación preferencial de las plagioclasas. La roca está conformada por una mineralogía de plagioclasas de forma tabular euhedral y subhedral con tamaños que van de 1 a 3  $\mu\text{m}$ , con maclado tipo albita, piroxenos en su mayoría clinopiroxenos (Fig. 54C) que funcionan como fenocristales y microfenocristales dispuestos en toda la sección delgada, del tamaño 2 mm a 5 mm, presentan color verde pálido, café claro, o incoloro, anhedrales y subhedral de forma alargada y muchas veces redondeada, (Fig. 54D), en menor proporción ortopiroxenos de forma euhedral y rectangular en tamaños mayores a 4 mm que a los bordes están siendo reemplazados o alterados por anfíboles (Fig. 54E), algunos rodeados por clinopiroxenos oxidados (Fig. 54F), finalmente pequeños óxidos dispuestos en toda la sección delgada. La matriz está compuesta por microcristales de plagioclasas de hasta 1  $\mu\text{m}$  y microcristales de piroxenos de forma redondeada de tamaños menores a 1  $\mu\text{m}$ . Por su contenido mineralógico estas rocas se clasifican como andesitas.

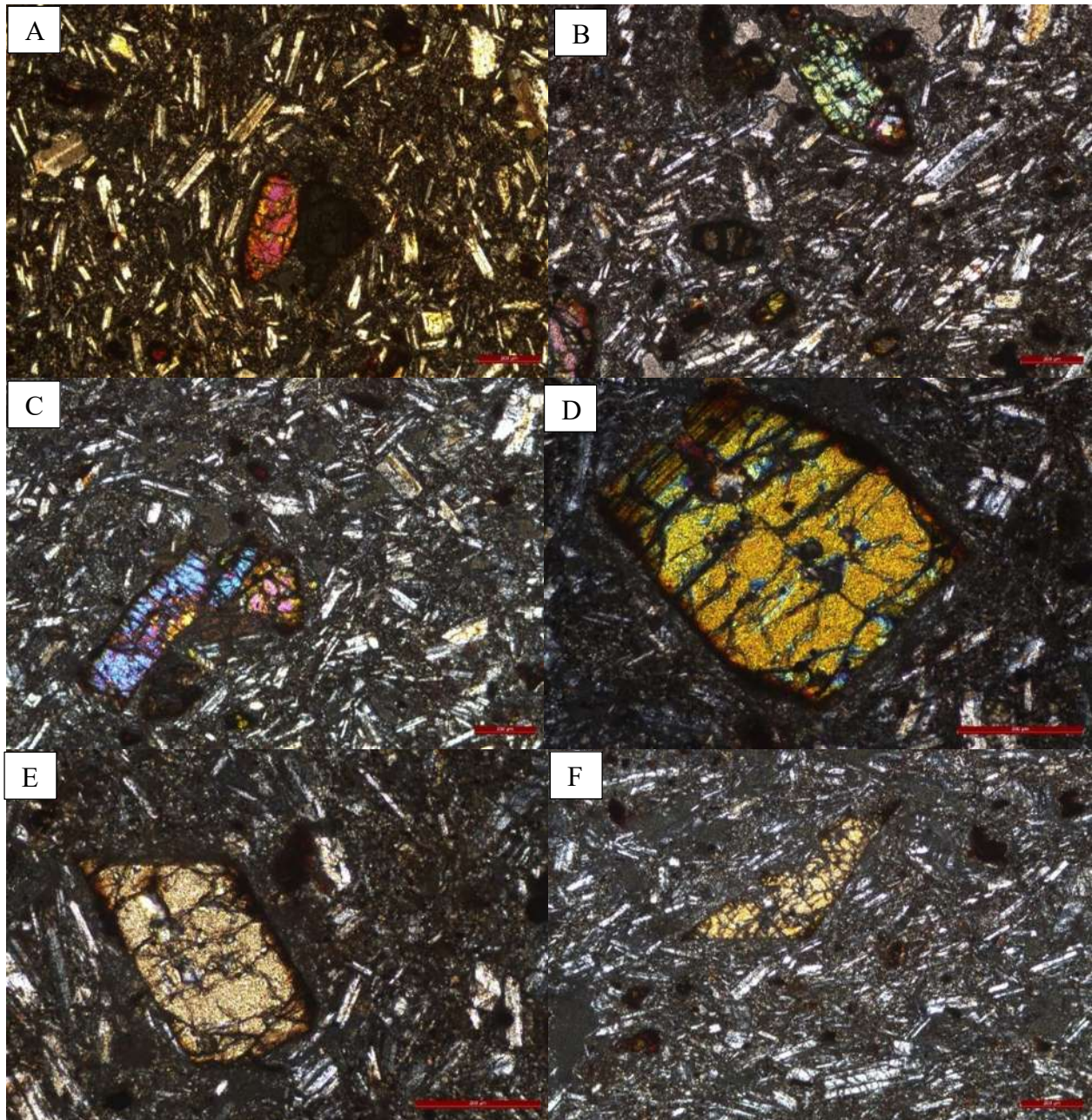


Figura 54.- Microfotografías de la Unidad andesítica y Conos de escoria Concepción, muestra 9 Jardín. A) Textura porfídica, clinopiroxenos inmersos en una matriz de plagioclasas. B) Textura pilotaxítica, los minerales se observan orientados en una dirección. C) Clinopiroxenos con altos colores de birrefringencia y crucero característico. D) Clinopiroxeno como fenocristal de color amarillo claro, dentro de él se observan pequeños clinopiroxenos oxidados. E) Ortopiroxeno inmerso en una matriz de plagioclasas. F) Ortopiroxeno como fenocristal en una matriz de plagioclasas y clinopiroxenos oxidados y redondeados.

### 5.3.4 Unidad Andesítica Capula

La muestra 14 Capula ubicada al norte de la misma localidad presenta una textura pilotaxítica donde las plagioclasas se observan orientadas hacia una dirección preferencial (Fig. 55A). La asociación mineralógica de estas muestras en orden de abundancia consiste de plagioclasas tabulares con maclado tipo albita de hasta 2 mm de formas euhedrales y subhedrales, algunas llegan a presentar zoneamiento, clinopiroxenos como microcristales en forma redondeada y en ocasiones de forma alargada o tabular con su crucero característico a 90° (Fig. 55B), se presentan como microcristales en tamaños desde 3  $\mu\text{m}$  hasta 5  $\mu\text{m}$  con forma euhedral a subhedral, algunos fracturados (Fig. 55D) en menor proporción ortopiroxenos de forma subhedral a anhedral que se encuentran como aglomerados de minerales (Fig. 55E), muy poco contenido de anfíboles (hornblendas) de color café claro y de tamaños del orden de 5  $\mu\text{m}$  (Fig. 55F). Todos estos cristales inmersos en una mesostasis más fina formada por microlitos de plagioclasas y piroxenos, la asociación mineralógica permitió clasificar a estas rocas como andesitas.



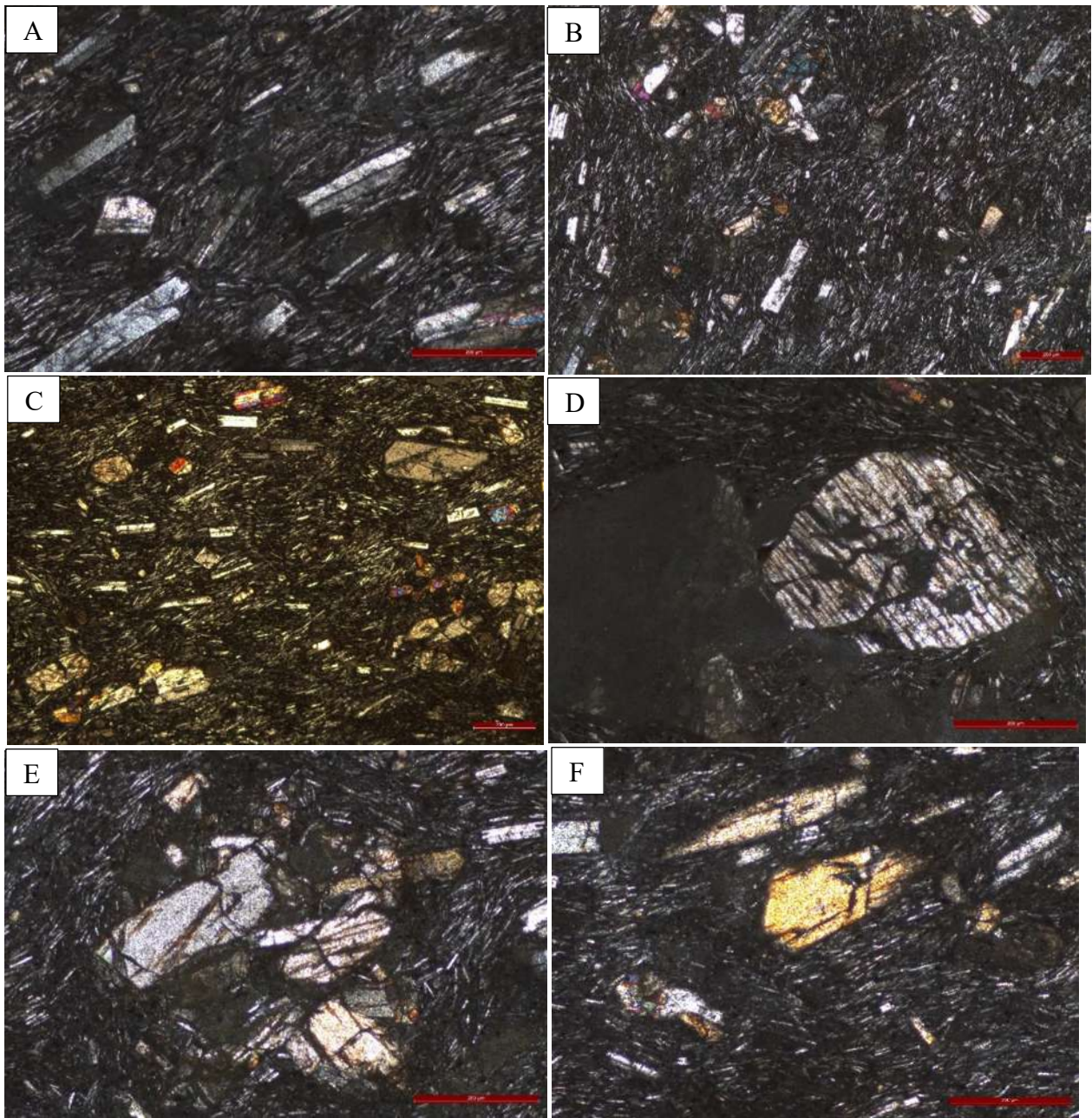


Figura 55.- Microfotografías de la Unidad Andesítica Capula. Muestra 14 Capula Norte. A) Textura pilotaxítica de la muestra, donde es posible observar que las plagioclasas se orientan en una dirección. B) Mineralogía de microcristales de piroxenos y plagioclasas. C) Mineralogía de microcristales de piroxenos y plagioclasas D) Clinopiroxeno fracturado y redondeado. E) Aglomerado de ortopiroxenos con clinopiroxenos que funcionan como fenocristales inmersos en una matriz de plagioclasas microlíticas. F) Pequeños anfíboles de color café.

## 5.4 Interpretación estructural

### 5.4.1 Fallas geológicas

En la zona de estudio fueron interpretadas de acuerdo al Modelo Digital de Elevaciones (MDE) fallas normales y fracturas menores o lineamientos de conos, funcionan como un sistema de drenaje para los flujos de escurrimiento hídrico y permiten la infiltración de agua; la figura 56 muestra la ubicación de todas ellas. La Falla de Cointzio localizada sobre la Ignimbrita Atécuaro, la cual se muestra dividida en dos segmentos, tiene una dirección E-O con una longitud que va desde el sur de la localidad de Cointzio hasta cortar una parte de la unidad El Remolino. La falla Cerritos de orientación E-O que aflora sobre la Ignimbrita Atecuario al contacto con la Secuencia Fluvio-lacustre. Sobre la Dacita Itzícuaró en contacto con la Secuencia Fluvio-lacustre se localiza la falla La Colina de orientación NE-SO. Dos fallas son las que afectan a la Unidad Andesítica y cono de escoria Concepción, tienen una orientación NE-SO y cortan a los conos de escorias en su cima. El principal lineamiento es el que orienta a dos conos de la Unidad Conos de escoria Tacícuaró junto al cono de escoria de la Concepción, de dirección NE-SO. Por último en los límites de la unidad El Águila y El Remolino se manifiesta una falla de orientación NE-SO.

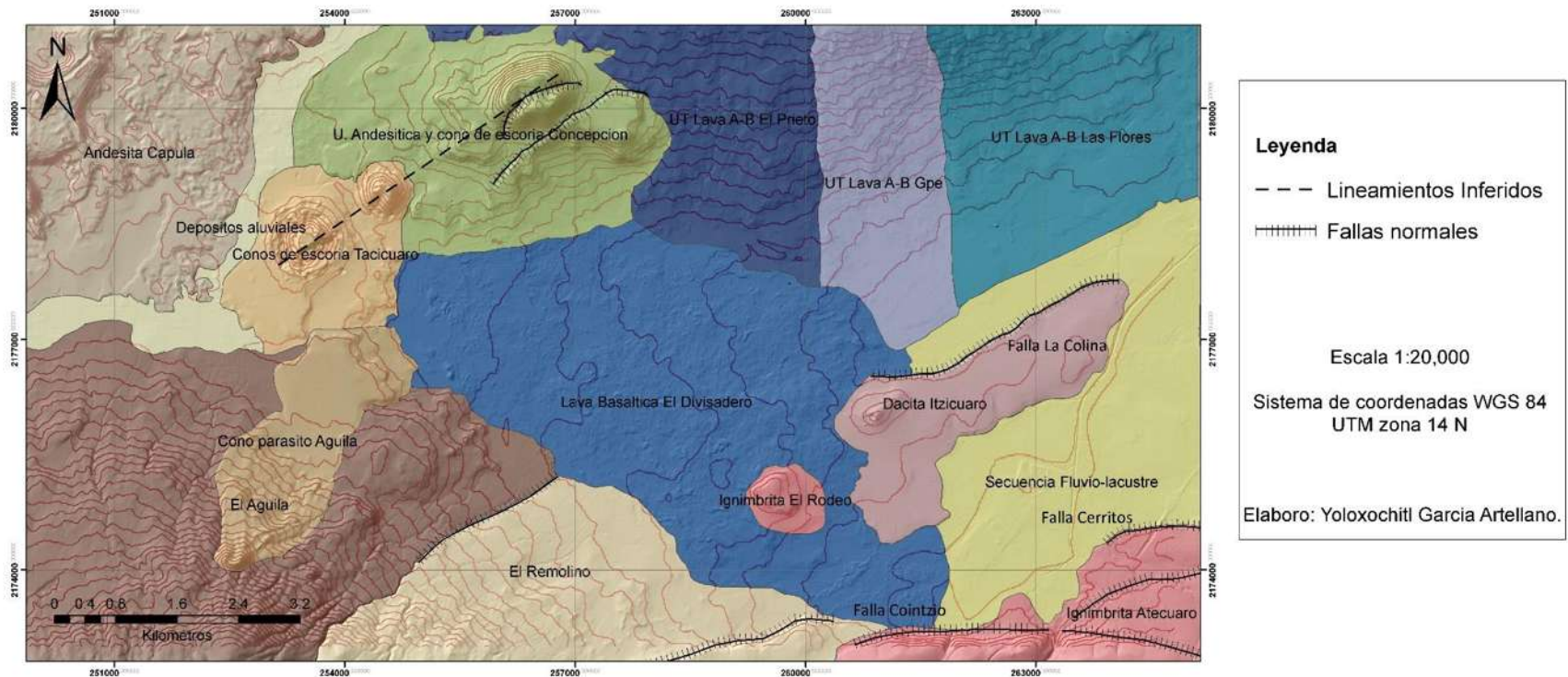


Figura 56.- Mapa de las fallas de la zona de estudio. Las líneas más tenues corresponden a fallas normales, las líneas punteadas corresponden a lineamientos inferidos por la alineación de estructuras volcánicas.

## 5.4.2 Ubicación de la toma de datos estructurales

El mapa de la figura 57 muestra la ubicación de los afloramientos donde fueron tomados los datos estructurales.

Para la unidad Andesita Mil Cumbres fue considerado el afloramiento del Río Chiquito, ubicado en las coordenadas UTM X= 274,208, Y= 2, 177,162, elevación 1,954 m.

Para la unidad Ignimbrita de Atécuaro fue considerado el afloramiento ubicado en la Loma de Santa María en las coordenadas UTM X= 272,641, Y= 2, 175,723, elevación 2094 m.

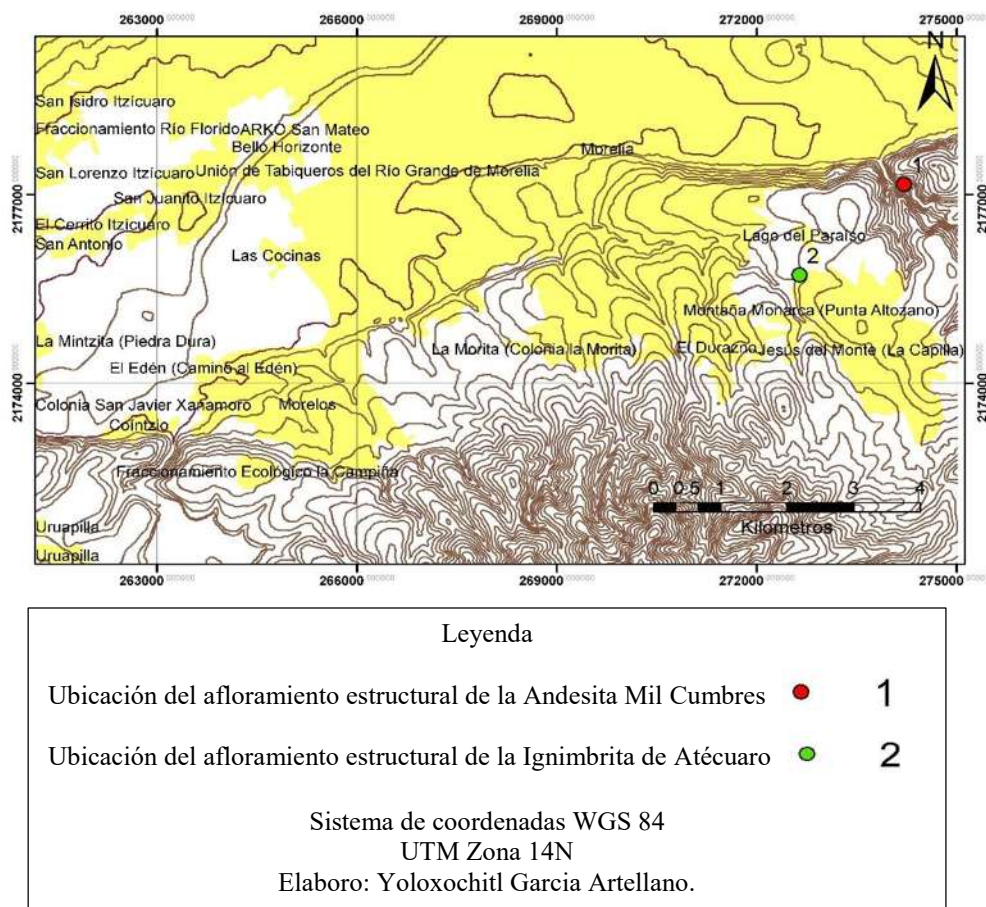


Figura 57.- Ubicación de los afloramientos donde se tomaron los datos estructurales.

El punto rojo muestra la ubicación del Afloramiento del Río Chiquito con la Unidad Andesita Mil Cumbres. El punto verde muestra la localización del afloramiento ubicado en la Loma de Santa María en la Unidad Ignimbrita de Atécuaro.

### 5.4.3 Resultados estructurales de la Andesita Mil Cumbres

En esta unidad fueron tomadas nueve ventanas circulares de muestreo midiendo un total de 256 datos estructurales, longitud y apertura de cada fractura; el cruce de los planos de fracturas dio un total de 2,050 datos, que fueron utilizados para realizar una roseta de rumbos, que ayudó a identificar el movimiento del flujo subterráneo. La roseta de la figura 58 indica un movimiento de flujo en dirección principalmente NE-SO.

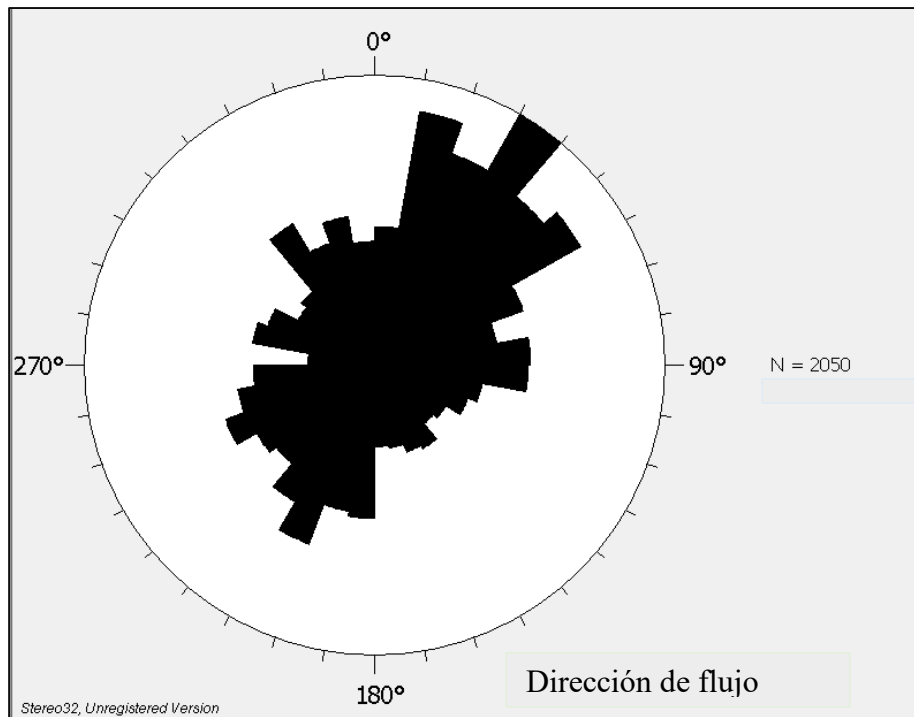


Figura 58.- Roseta del movimiento de flujo subterráneo en la unidad Andesita Mil Cumbres indicando un movimiento con dirección preferencial NE-SO.

### 5.4.4 Porosidad por fisuración de la Andesita Mil Cumbres

Los resultados considerando a las fracturas como un rectángulo dan una porosidad por fisuración de 1.007% en caso de considerar a las fracturas como una elipse la porosidad por fisuración da un valor de 0.82%.

### 5.4.5 Longitud de fracturas de la Andesita Mil Cumbres

La gráfica de la figura 59 muestra la frecuencia de la longitud de las fracturas medida en centímetros de la Unidad Andesita Mil Cumbres, el mayor porcentaje de fracturas (35.54%) se ubica entre 11 y 20 cm seguido de una longitud entre 21 y 30 cm con el 22.26%. En cambio el menor porcentaje (1.17 %) lo tienen las longitudes de 71-80 cm y 81-90 cm lo que indica que las fracturas con mayor longitud son menos frecuentes.

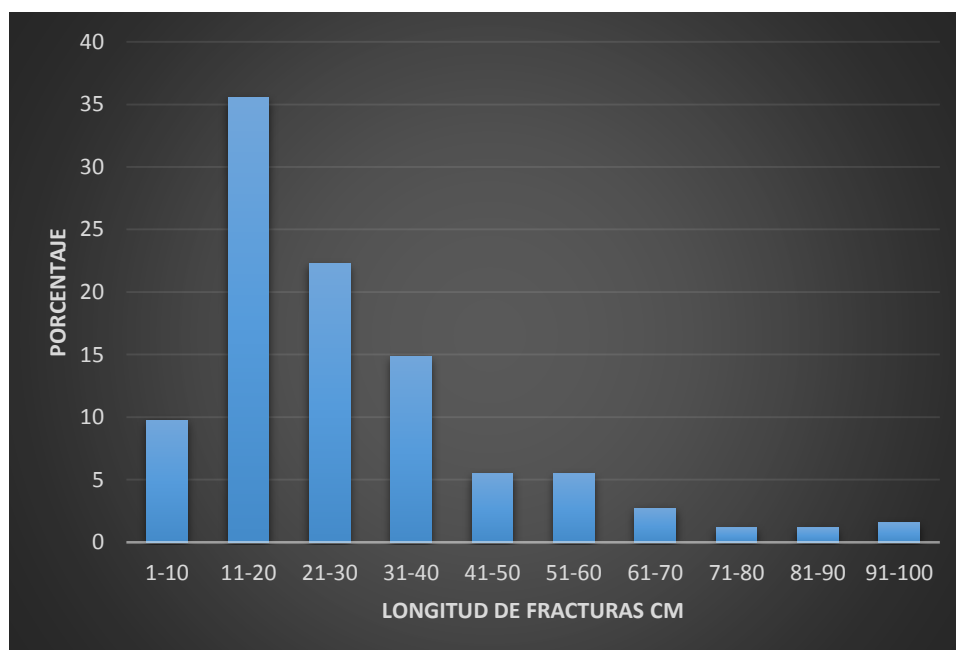


Figura 59.-Gráfica de la frecuencia de longitud de fracturas en la Unidad Andesita Mil Cumbres.

### 5.4.6 Frecuencia de las aperturas de fracturas en la Andesita Mil Cumbres

La figura 60 muestra la gráfica correspondiente a la frecuencia de las aperturas en la unidad andesítica, en esta gráfica se muestra un mayor porcentaje en 0.40 mm de apertura, seguido de 0.265 mm y 0.50 mm de apertura, esto demuestra que las aperturas de esta unidad son muy pequeñas.

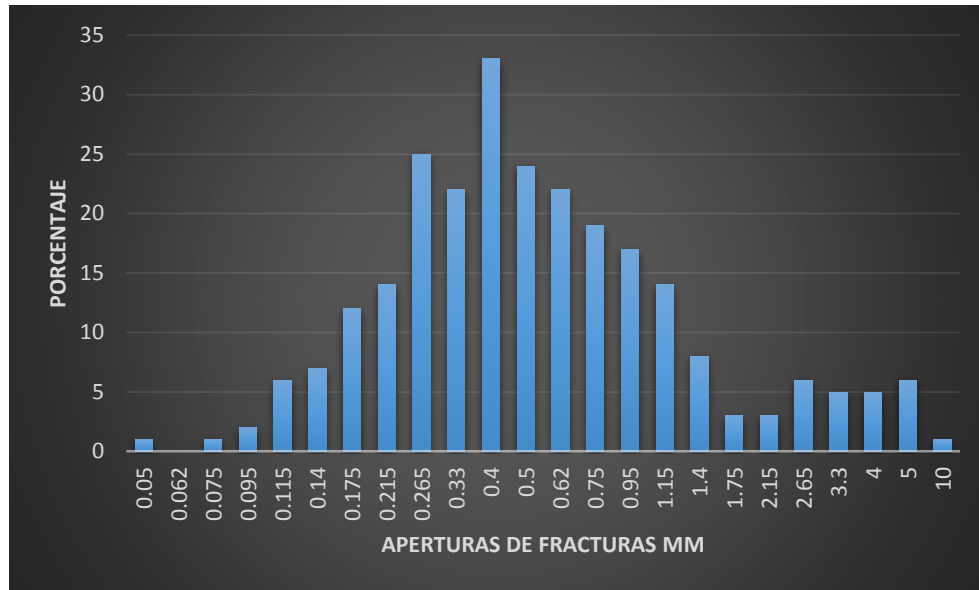


Figura 60.- Gráfica de la frecuencia de aperturas de fracturas en la Unidad Andesita Mil Cumbres.

#### 5.4.7 Resultados estructurales de la Ignimbrita de Atécuaro

Para esta unidad se realizaron cinco ventanas circulares de muestreo, midiendo un total de 101 datos estructurales, longitud y apertura de cada fractura; el cruce de los planos de fracturas dio un total de 625 datos con los que se realizó una roseta de rumbos que ayudo de definir el movimiento del fluido subterráneo.

La figura 61 muestra la roseta que indica un movimiento de flujo en dirección preferencial NE-SO y E-O.

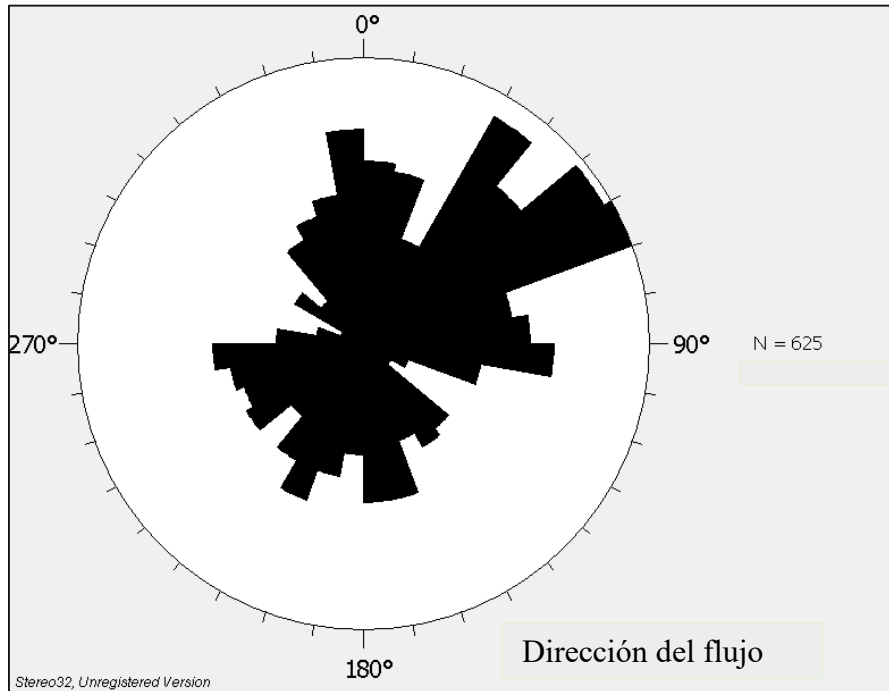


Figura 61.- Roseta del movimiento de flujo subterráneo en la unidad Ignimbrita de Atécuaro indicando un movimiento con dirección preferencial NE-SO y E-O.

#### 5.4.8 Porosidad por fisuración de la Ignimbrita de Atécuaro

Los resultados considerando a las fracturas como un rectángulo dan una porosidad por fisuración de 4.92% en caso de considerar a las fracturas como una elipse la porosidad da un valor de 5.68%.

#### 5.4.9 Longitud de fracturas de la Ignimbrita de Atécuaro

La gráfica de la figura 62 muestra la frecuencia de la longitud de las fracturas medida en centímetros, de la Unidad Ignimbrita de Atécuaro, el mayor porcentaje de fracturas (27.7%) se ubica entre 21 y 30 cm seguido de una longitud entre 11 y 20 cm con el 26.72% que es un porcentaje que varía muy poco con respecto del anterior. En cambio el menor porcentaje (0.99%) lo tienen las longitudes de 71-80 cm.



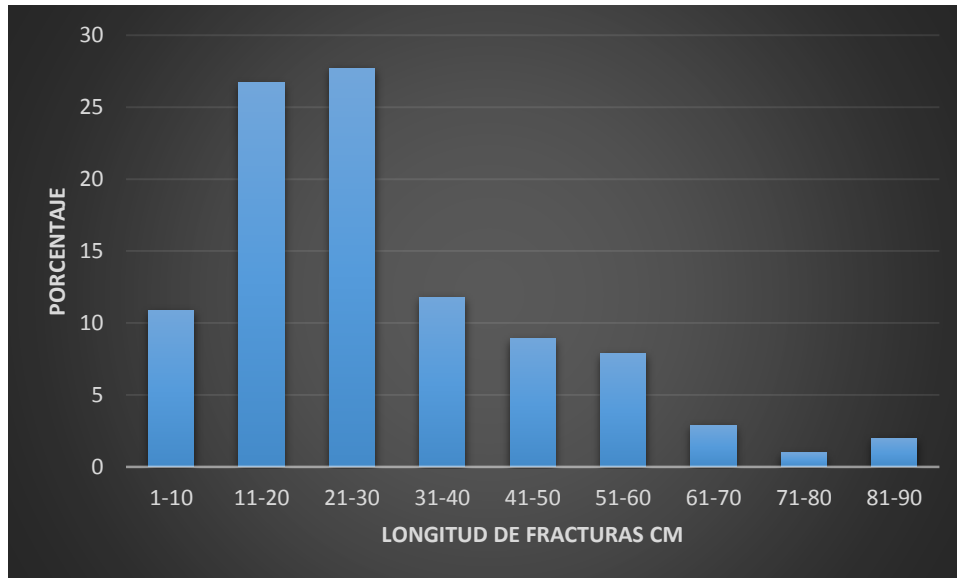


Figura 62.-Gráfica de la frecuencia de longitud de fracturas en la Unidad Ignimbrita de Atécuaro.

#### 5.4.10 Frecuencia de las aperturas de fracturas en la Ignimbrita de Atécuaro

La figura 63 muestra la gráfica correspondiente a la frecuencia de las aperturas en la unidad ignimbrítica, en esta gráfica se muestra un mayor porcentaje en 10 mm de apertura, seguido de 3.3 mm y 2.65 mm de apertura, esto demuestra que las aperturas de esta unidad son más grandes en comparación con la unidad anterior.

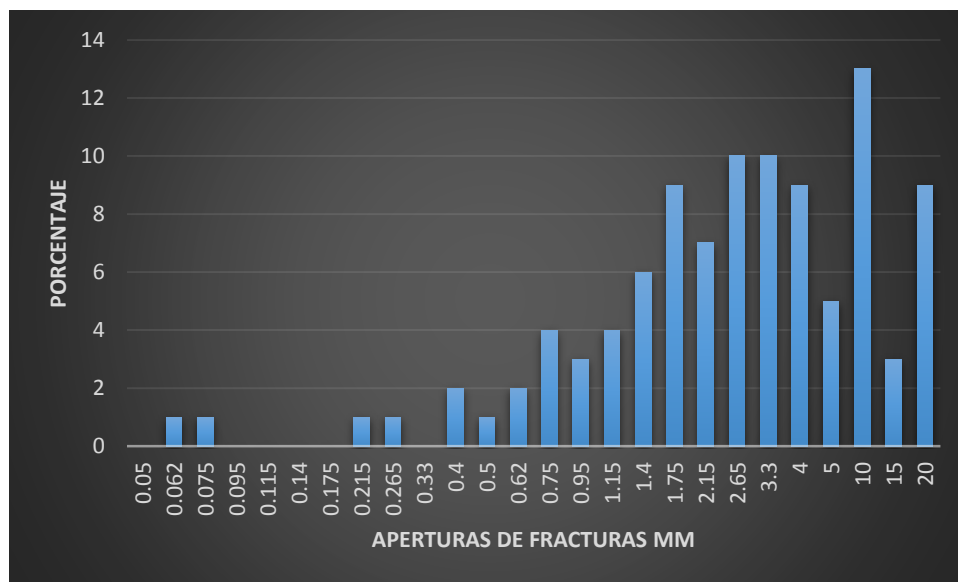


Figura 63.- Gráfica de la frecuencia de apertura de fracturas en la Unidad Ignimbrita de Atécuaro.

## 5.5 Interpretación geofísica

### 5.5.1 Ubicación de los perfiles geofísicos

El mapa de la figura 64 muestra la ubicación de los perfiles geofísicos. Ambos perfiles fueron planeados de manera que existiera un camino accesible para transportar el equipo. El caso del perfil 1 también se planeó con el objetivo de interceptar de manera perpendicular la línea de la falla la Colina que se ubica al Oriente. El perfil 1 Villas del Pedregal de orientación N-S, tuvo una longitud de 2,100 m y se ubicó en la parte este del fraccionamiento Villas del Pedregal en las coordenadas UTM: Punto de inicio X= 259,120 Y= 2, 177,954 elevación 1,939 m, (electrodo 1); punto medio donde se encontraba el equipo X= 258,925 Y= 2, 176,884 elevación 1,955 m y punto final: X= 258,525 Y= 2, 176,694 elevación 1,965 m (electrodo 84). El perfil 2 Capula tuvo una orientación E-O, una longitud de 1,050 m y ubicado en la parte norte de Capula en las coordenadas UTM: Punto de inicio (electrodo 1) X= 248,907 Y= 2, 177,710 elevación 2,094 m; punto final (electrodo 42) y punto donde se encontraba la consola X= 250,135 Y= 2, 178,493 elevación 2,099 m.

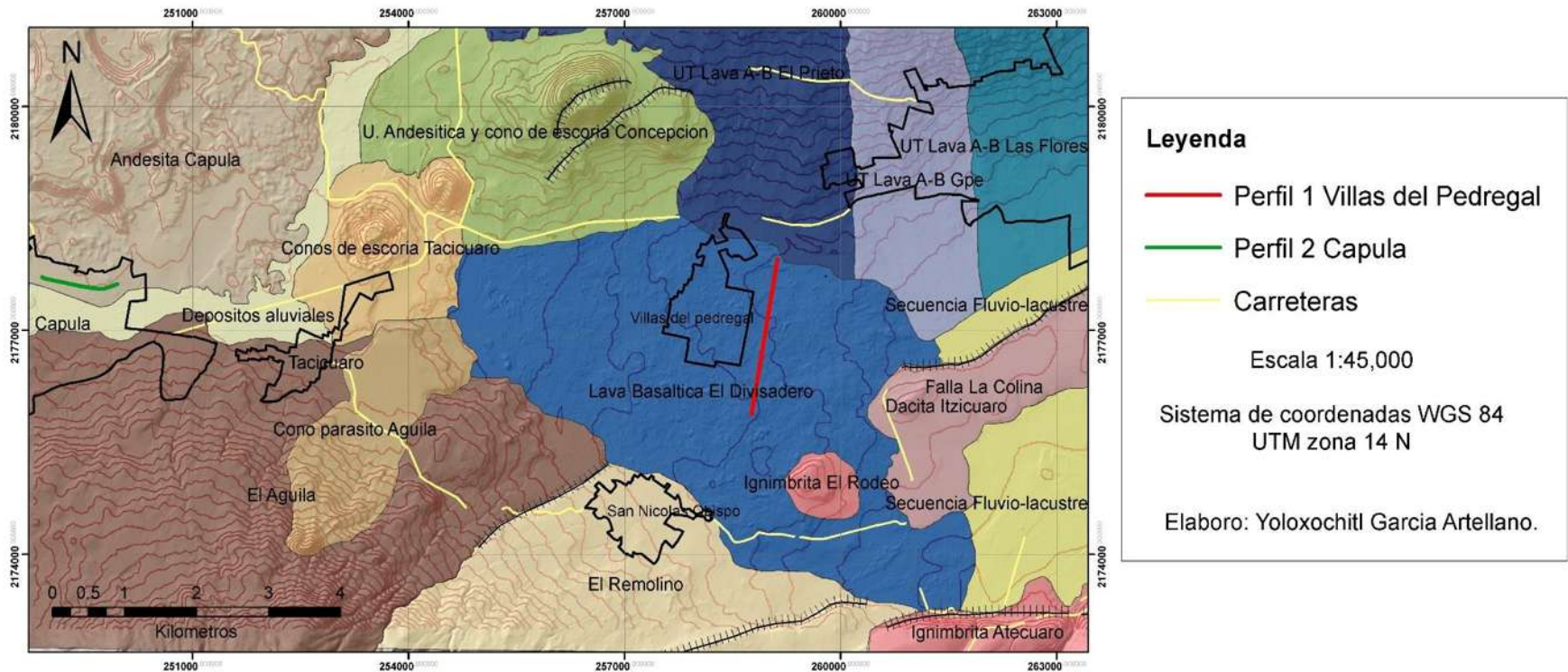


Figura 64.- Ubicación de los perfiles geofísicos. La línea roja muestra la ubicación del Perfil 1 Villas del Pedregal, la línea verde muestra la ubicación del Perfil 2 Capula.

### 5.5.2 Datos crudos de los perfiles geofísicos

Las figuras 65 y 66 muestran los datos crudos del perfil 1 y perfil 2 respectivamente, el procesamiento de los datos es similar para cada perfil por lo que los datos crudos generan básicamente tres imágenes en ambos perfiles. La primera imagen hace referencia a la pseudosección de resistividades aparentes de todos los materiales, es decir, es un promedio de resistividades de todos los materiales que se encuentran en ese punto, cada punto es una medición de resistividad. Para el caso del perfil 1 los puntos faltantes son los que el operador elimina y el programa de manera automática sugiere por considerarlos erróneos o que pueden causar alguna interferencia en el procesamiento y posterior interpretación, en este caso fueron eliminados los datos negativos. Para el caso del perfil 2 ninguna medición fue eliminada, ya que no existieron datos negativos. La imagen dos muestra la pseudosección de resistividad calculada para cada material, es decir cada resistividad es asociada a un material. La última imagen muestra los datos ya procesados que pueden ser interpretados desde un punto de vista geológico de la zona.

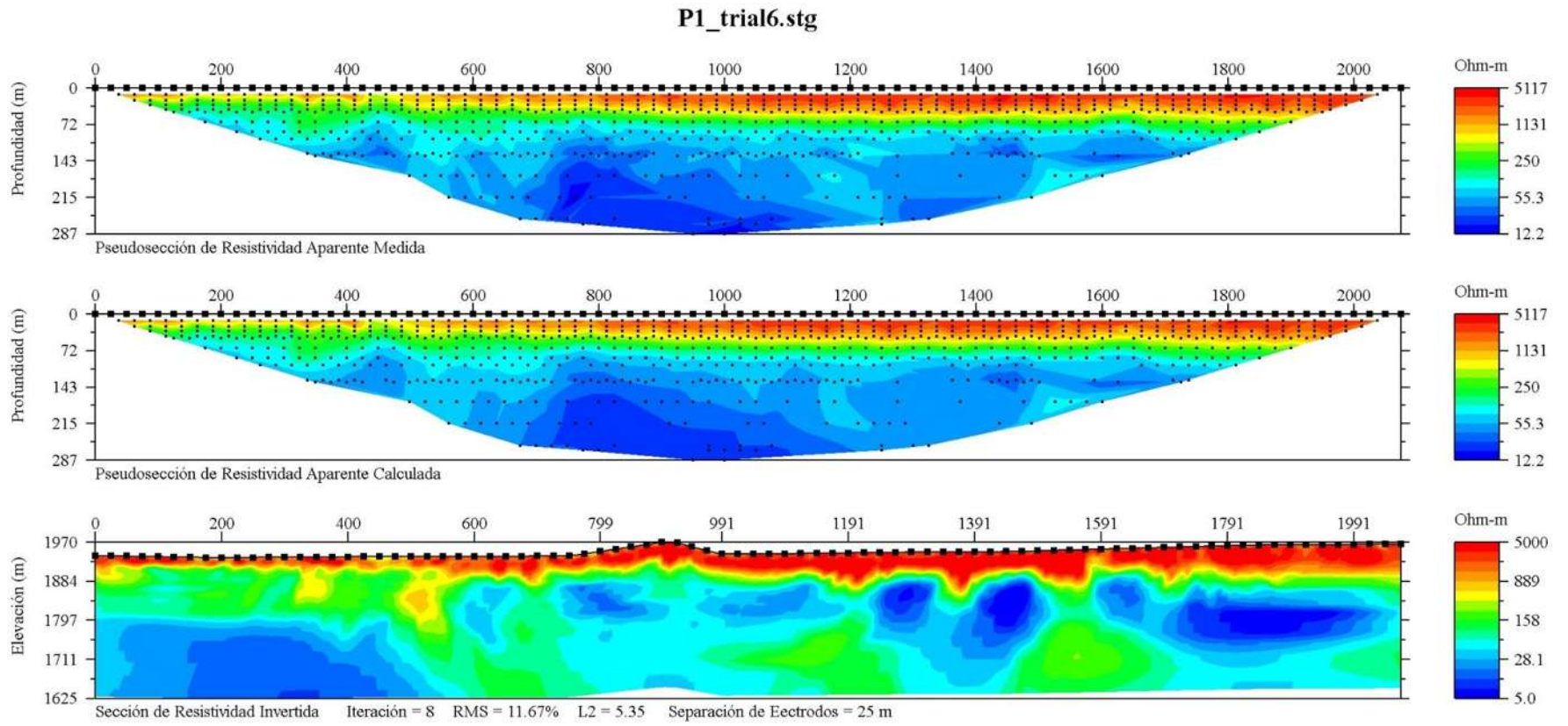


Figura 65.- Datos crudos del perfil 1 Villas del Pedregal.

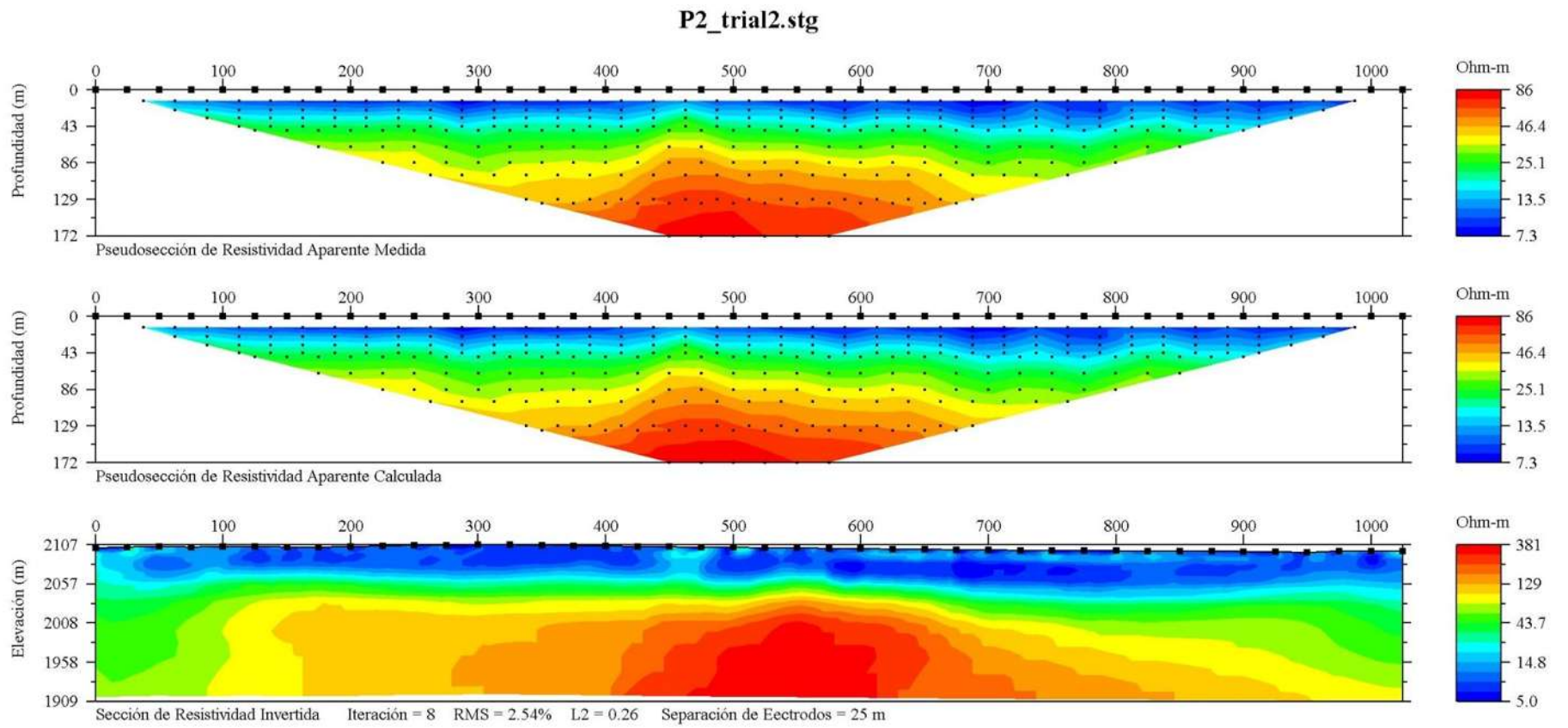


Figura 66.-Datos crudos del perfil 2 Capula.

### 5.5.3 Interpretación geofísica de los perfiles

#### 5.5.3.1 Perfil 1 Villas del Pedregal

La figura 67 muestra la sección procesada del perfil 1. Esta sección alcanzó una profundidad aproximada de 315 m, tiene un porcentaje de error de 11.67% y se realizaron 8 iteraciones para obtener este resultado. Este error no pudo ser disminuido debido a que algunos datos negativos que pudieron deberse a la interacción terreno-electrodo tenían que ser eliminados para que el error disminuyera, pero eso causaría incertidumbre en el modelo y por lo tanto en la interpretación.

Para adjuntar la topografía al perfil fueron consideradas las alturas de los puntos GPS que se tomaron en campo y también se consideró necesario obtener un perfil topográfico con ayuda del programa Arcmap y el Modelo Digital de Elevaciones con resolución a 5 m (Fig. 68). Este perfil muestra una diferencia de elevación del punto inicial al final de aproximadamente de 26 m, valor muy bajo en comparación con la longitud del perfil.

La interpretación de este perfil (Fig.71) de acuerdo a la diferencia de resistividades permite identificar tres estratos o cuerpos que están delimitados con líneas punteadas en color negro. El primero está asociado a los colores rojos intensos junto con el color amarillo dado que este último no tiene gran predominio y se apega más a los valores con resistividad alta, la resistividad de este paquete oscila desde los 5,000 Ohm-m a los 706 Ohm-m con los colores rojos y amarillos respectivamente, forma una capa muy regular a lo largo de todo el perfil lo que es concordante en medios volcánicos. El segundo paquete corresponde a los colores verdes de resistividades del orden de 158 Ohm-m a 125.5 Ohm-m. El último paquete corresponde a los colores azules con resistividades que oscilan desde los 5 Ohm-m hasta 93 Ohm-m con colores turquesa o azules muy bajos.

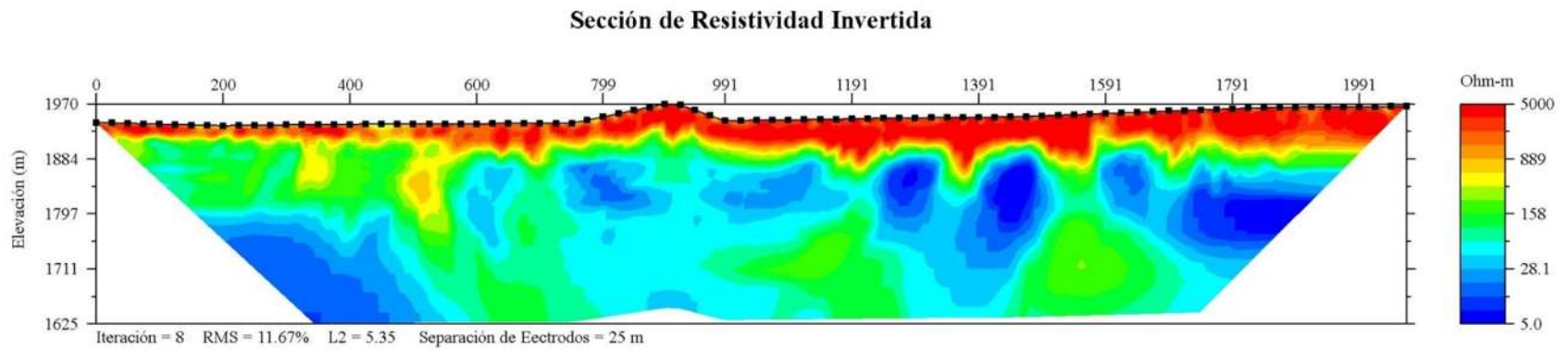


Figura 67.- Sección geofísica procesada del perfil 1 Villas del Pedregal

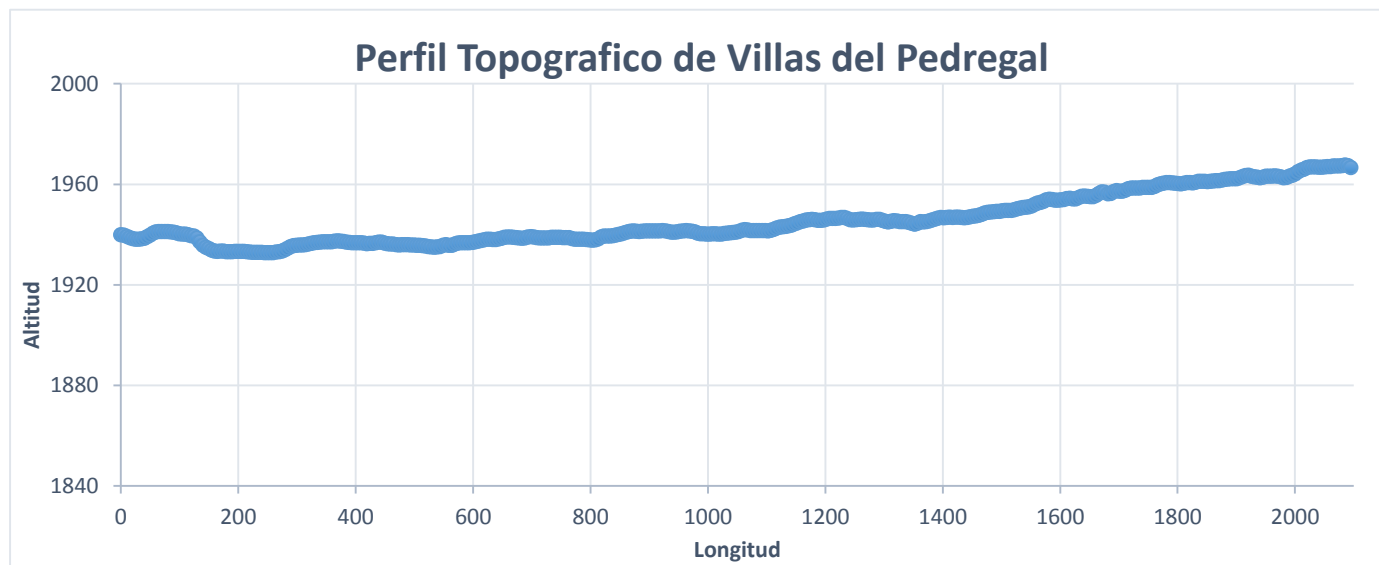


Figura 68.- Perfil topográfico de la zona donde fue realizado el perfil geofísico en villas del Pedregal.



### 5.5.3.2 Perfil 2 Capula

La figura 69 muestra la sección procesada del perfil 2. Esta sección alcanzó una profundidad aproximada de 189 m, presenta un porcentaje de error de 2.54% y se realizaron 8 iteraciones para obtener este resultado.

Para adjuntar la topografía al perfil fueron consideradas las alturas de los puntos GPS que se tomaron en campo y también se consideró necesario obtener un perfil topográfico con ayuda del programa Arcmap y el Modelo Digital de Elevaciones con resolución a 5 m; este perfil muestra una diferencia de elevaciones del punto inicial al final de aproximadamente 5 metros (Fig. 70).

La figura 72 representa una sección con una respuesta eléctrica muy homogénea, la interpretación dada de acuerdo a la diferencia de resistividades, identificó tres estratos o cuerpos que están delimitados con líneas punteadas en color negro. El primero relacionado con los colores azules intensos a azules más bajos, la resistividad de este paquete oscila desde los 5 Ohm-m a los 28 Ohm-m. El segundo paquete corresponde con los colores verde muy bajo a azul muy bajo o color turquesa del orden de resistividades de 93 Ohm-m a 125.5 Ohm-m, aunque este paquete se muestra de manera muy regular, en los extremos, su espesor aumenta, probablemente esto puede ser ocasionado por falta de datos, el programa al llevar a cabo la interpolación hace que se generen espesores erróneos sin embargo esto no causa problemas más allá de los espesores. El último paquete corresponde a los colores verdes con resistividades que oscilan desde los 158 Ohm-m hasta los 340 Ohm-m

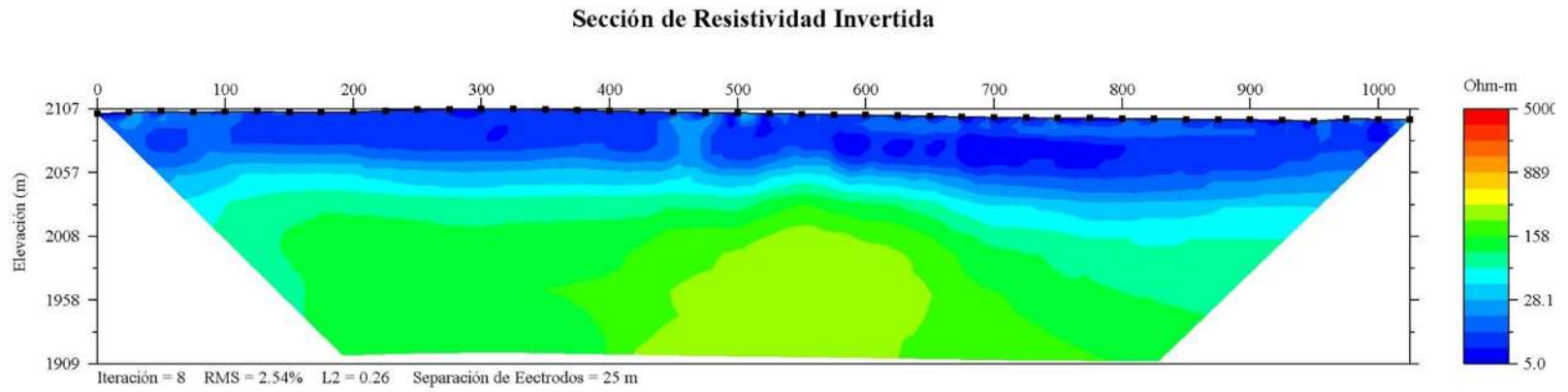


Figura 69.- Sección geofísica procesada del perfil 2 al norte de Capula.

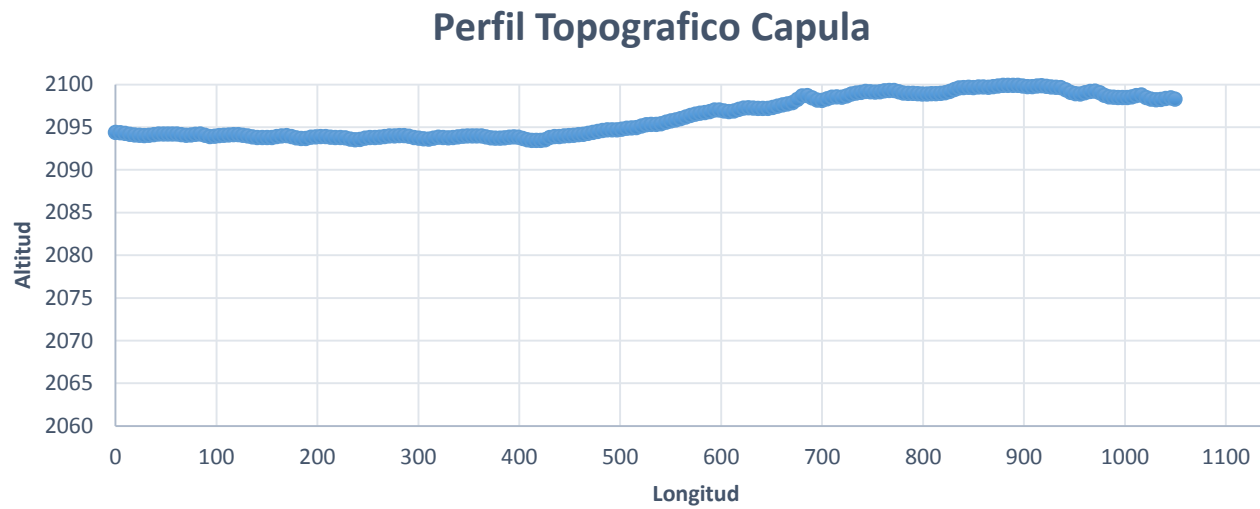


Figura 70.- Perfil topográfico de la zona donde fue realizado el perfil geofísico de Capula.

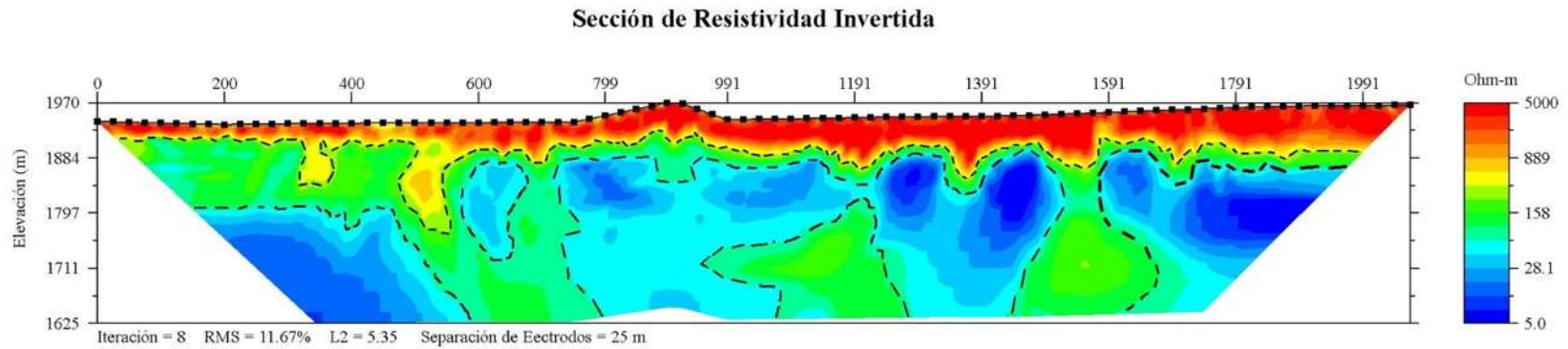


Figura 71.- Interpretación geofísica del perfil 1 Villas del Pedregal. Se muestran tres estratos marcados con líneas punteadas de color negro, de acuerdo a la diferencia de resistividades, el primero en colores rojo y amarillo, la segunda capa en colores verdes y, la tercera en colores azules.

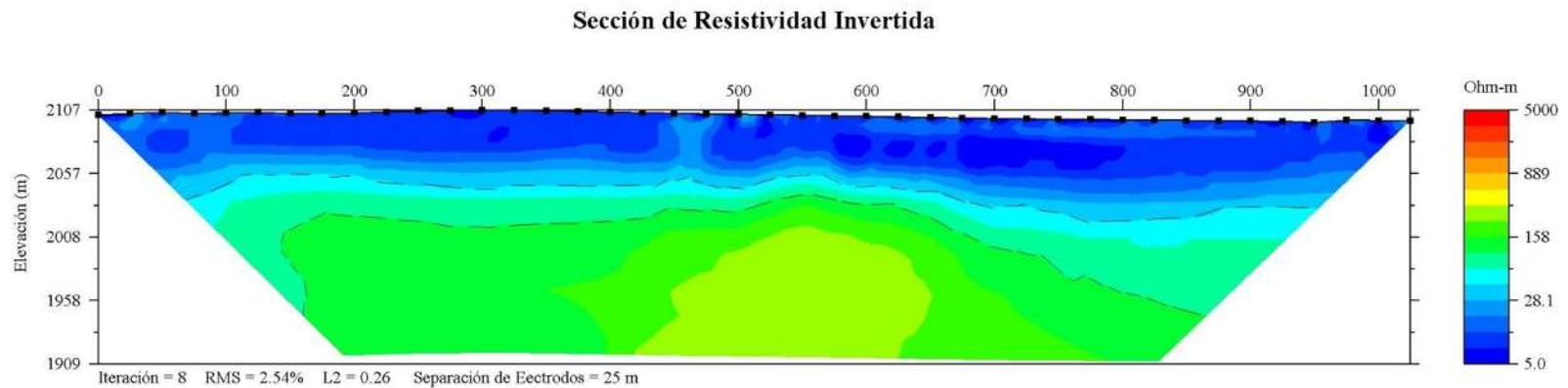


Figura 72.- Interpretación geofísica del perfil 2 Capula. Se muestran tres estratos marcados con líneas punteadas de color negro, de acuerdo a la diferencia de resistividades, el primero en colores azules, el segundo en colores azules bajos a turquesa y, el tercero en colores verde.

## 5.5.4 Interpretación geológica de los perfiles

### 5.5.4.1 Perfil 1 Villas del Pedregal

La interpretación geológica de este perfil de orientación N-S consideró datos de la geología superficial, la información de los pozos más cercanos al levantamiento geofísico (Fig. 73) en este caso los pozos 12 San José Itzicuario, 13 Cerrito Itzicuario, 17 Las Garzas, 18 San Nicolás Obispo y 19 Villa Magna que refieren a la litología del subsuelo (Figs. 74 y 75) y la relación de resistividades con los materiales geológicos de la zona. De acuerdo a dicha información se asocian a rocas basálticas; las resistividades del basalto oscilan en un rango muy amplio desde 50 hasta 5000 Ohm-m dependiendo si están fracturados, porosos o saturados. La figura 76 muestra la interpretación geológica de este perfil.

El estrato 1 marcado con color rojo de aproximadamente 40 a 70 m en profundidad (de norte a sur) se correlaciona con basaltos alterados (observados en superficie) o bien con basaltos fracturados ya que la información del pozo San José Itzicuario refiere desde los 2.33 m hasta los 71.5 m basaltos fracturados. La capa 2 de color verde es un estrato muy irregular empieza a partir de los 80 m y puede ser relacionado con una roca basáltica con cierto grado de saturación de agua entre los poros de la roca. Sobre este estrato se marcó una línea vertical a una longitud de 1,540 m aproximadamente y a partir de los 80 m de profundidad; posiblemente correlacionada con la falla La Colina de orientación NE-SO, considerando los cambios laterales en valores de resistividad (colores azules), aunque no existen trabajos que confirmen la prolongación de esta falla hacia esta unidad (Unidad Lava Basáltica el Divisadero) tampoco pudo ser observada en superficie ni en la interpretación del Modelo Digital de Elevación. El estrato 3 de color azul de forma muy irregular es asociado a una roca basáltica fracturada y saturada, se ubica desde los 82 m, dato que es correlacionado con el nivel piezométrico de la zona ubicado a partir de los 90 o 100 m. La presencia de resistividades bajas en estas formaciones geológicas (color azul fuerte), probablemente obedezcan a que el medio o el agua que satura contienen muchos minerales, por lo cual, si se llegara a realizar un pozo para extraer agua, se tienen que tomar muestras y enviar a laboratorio para su análisis; también se puede deber a la presencia de arcillas que tienen bajas resistividades. El pozo 18 San Nicolás Obispo refiere en sus primeros metros a basaltos y arcillas, y a partir de 68 m hasta 409 m reporta basaltos fracturados lo que permite interpretar que los 315 m de profundidad alcanzados en este perfil corresponden a una roca basáltica.

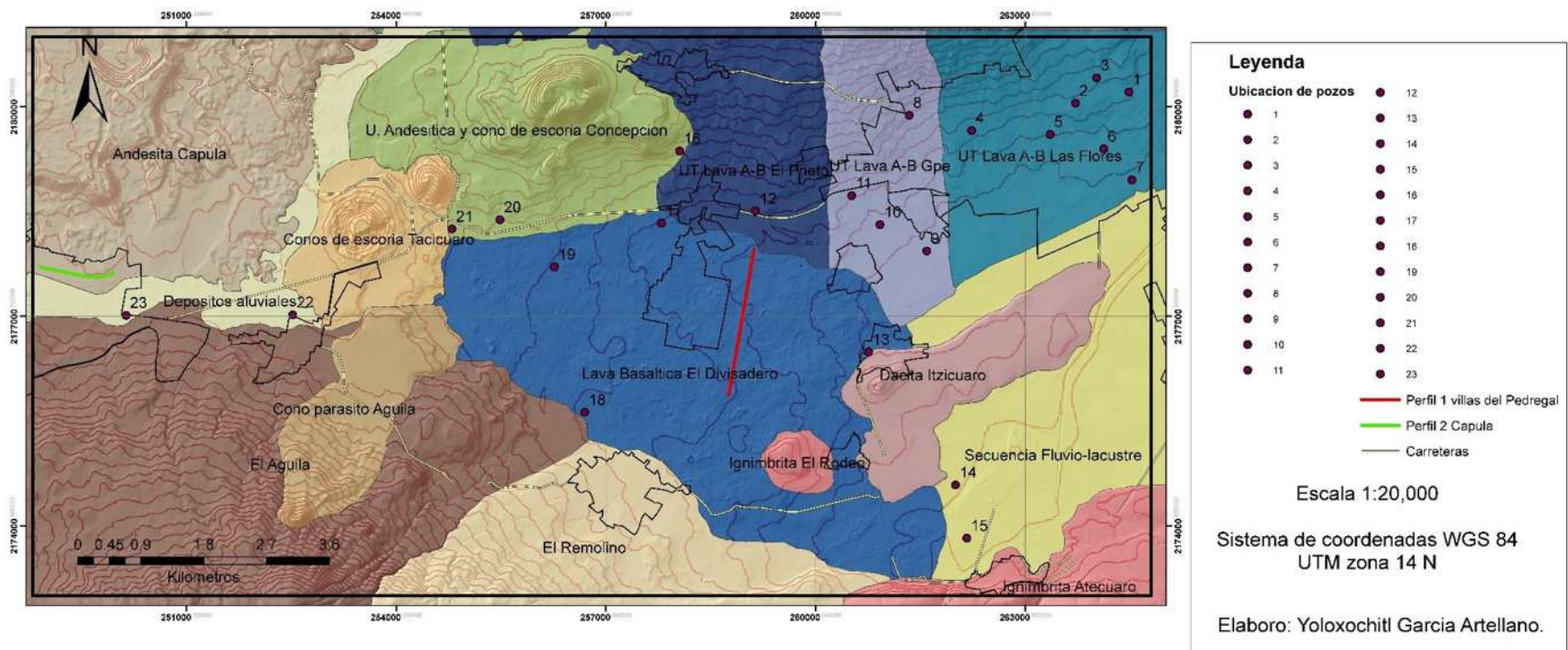


Figura 73.- Mapa de la ubicación de los pozos. Los pozos más cercanos al perfil Villas del Pedregal marcado con la línea roja son 12 San José Itzicuario, 13 Cerrito Itzicuario, 17 Las Garzas, 18 San Nicolás Obispo y 19 Villa Magna. El pozo más cercano al perfil Capula marcado con la línea verde es el número 23 de nombre Capula 2.

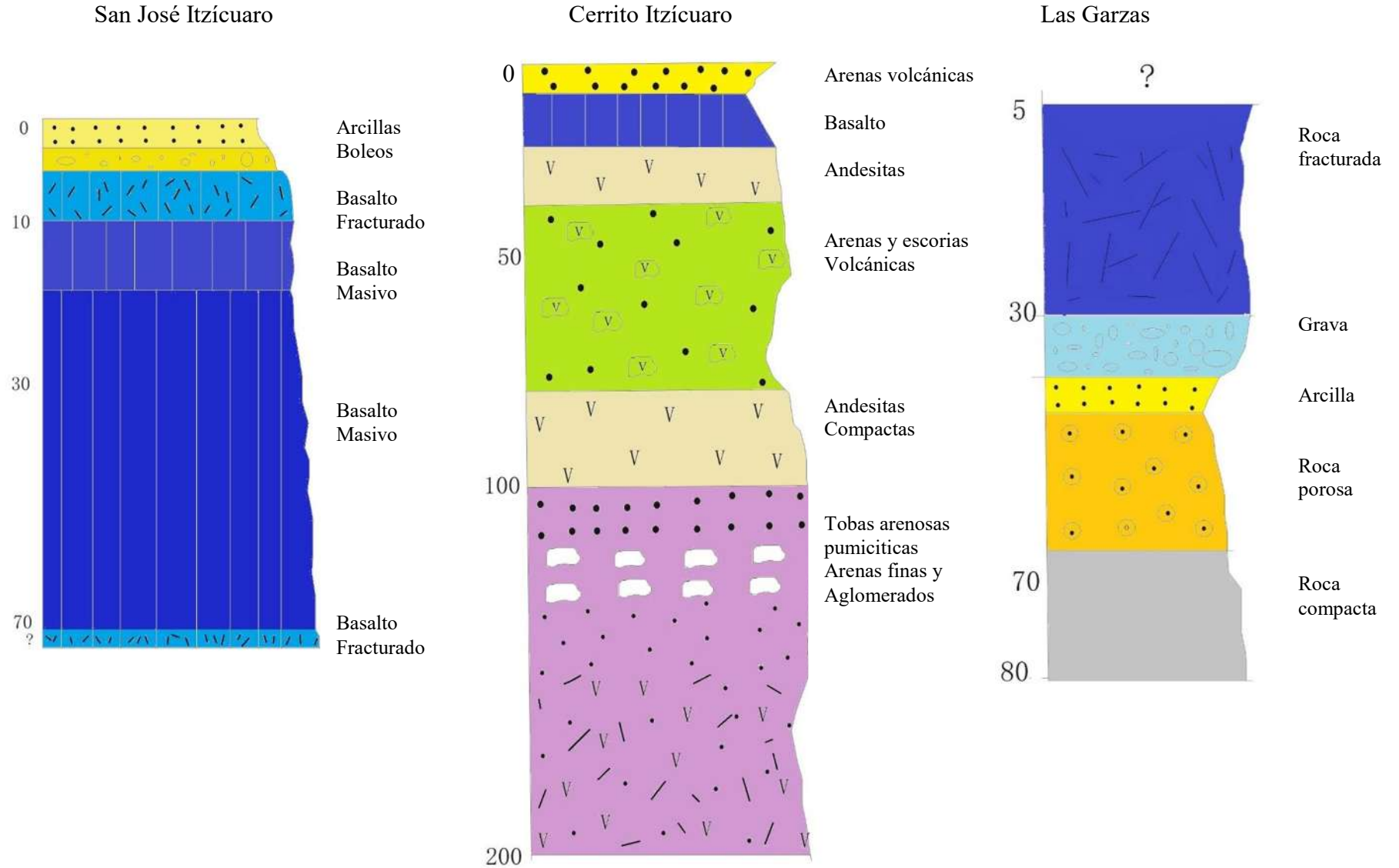


Figura 74.- Información litológica de los pozos más cercanos al perfil 1.

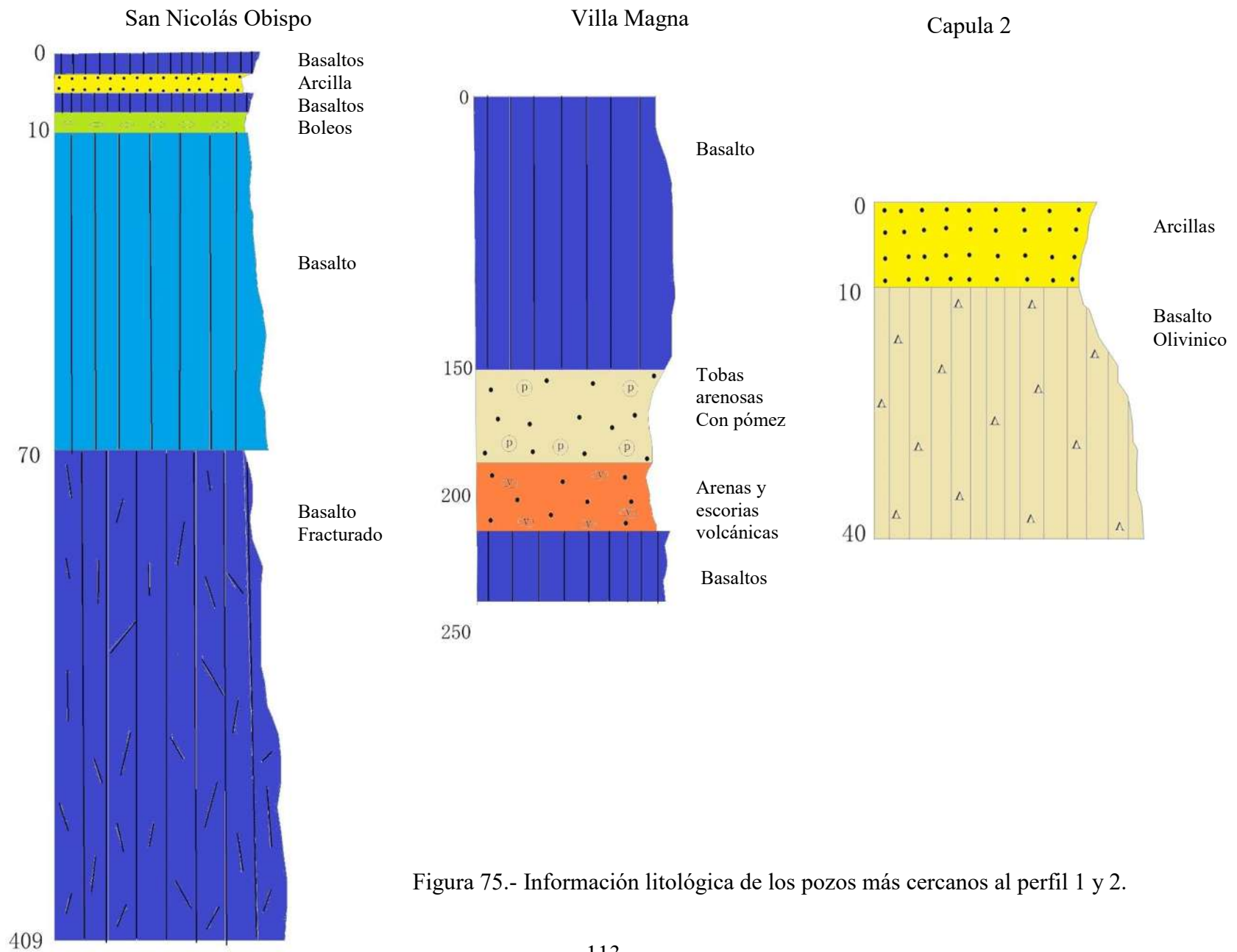


Figura 75.- Información litológica de los pozos más cercanos al perfil 1 y 2.

#### 5.5.4.2 Perfil 2 Capula

La interpretación geológica de este perfil de orientación E-O consideró datos de la cartografía, la información del único pozo del que se tiene información 23 Capula 2 (Fig. 75) y la relación de resistividades con los materiales geológicos de la zona. Considerando que las rocas de esa región son andesitas y que estas tienen una resistividad de 50 a 100,000 ohm-m pudiendo llegar a 100 ohm-m si están fracturadas, saturadas o dependiendo de la porosidad de la roca, por ello se delimitaron tres paquetes. La figura 77 muestra la interpretación geológica de este perfil. La capa 1 de color azul en los primeros metros es considerada como material de cobertura conformado por material arenoso-arcilloso que fue visto en campo; según información del pozo Capula 2 los primeros 12 m corresponden a arcillas. El estrato 1 tiene un espesor aproximado de 50 m, seguido de esa capa fina se infiere una roca andesítica alterada y/o fracturada con presencia de agua entre las fracturas, los colores azul fuerte del perfil geofísico indican que el agua o el medio es muy mineralizado, las muestras de mano cercanas a esa zona evidencian minerales de alteración en la roca; la información del nivel piezométrico en esta zona oscila entre 48 m, dato que corresponde con la interpretación de esta primera capa. El estrato 2 de color azul claro se relaciona con una roca fracturada y saturada, que junto con el estrato 1, son los cuerpos que podrían reunir las características para que en ella se proyecten pozos para extracción de agua, este estrato inicia a partir de los 40 m y termina a los 70 m, es decir tiene un espesor promedio de 30 m. La información del pozo Capula 2 refiere a partir de los 12 m hasta 40 m basalto olivinico, sin embargo en este trabajo se maneja como una roca andesítica ya que las descripciones de muestras de roca así lo sugieren. El estrato 3 de color verde se asocia a una roca andesítica moderadamente fracturada, desde el punto de vista geohidrológico solo se aprovecharían las dos primeras capas, se infiere que el fracturamiento disminuya dado que el gradiente resistivo empieza a aumentar.



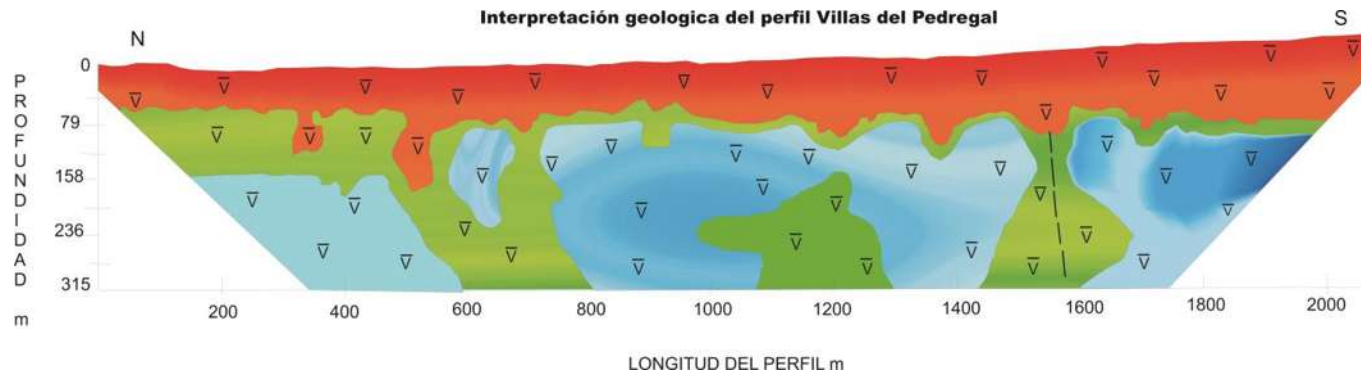


Figura 76.- Interpretación geológica del perfil 1 Villas del Pedregal. Se delimitan tres estratos marcados con color rojo, verde y azul delimitados de acuerdo a la diferencia de resistividades y asociados a basaltos con diferentes características.

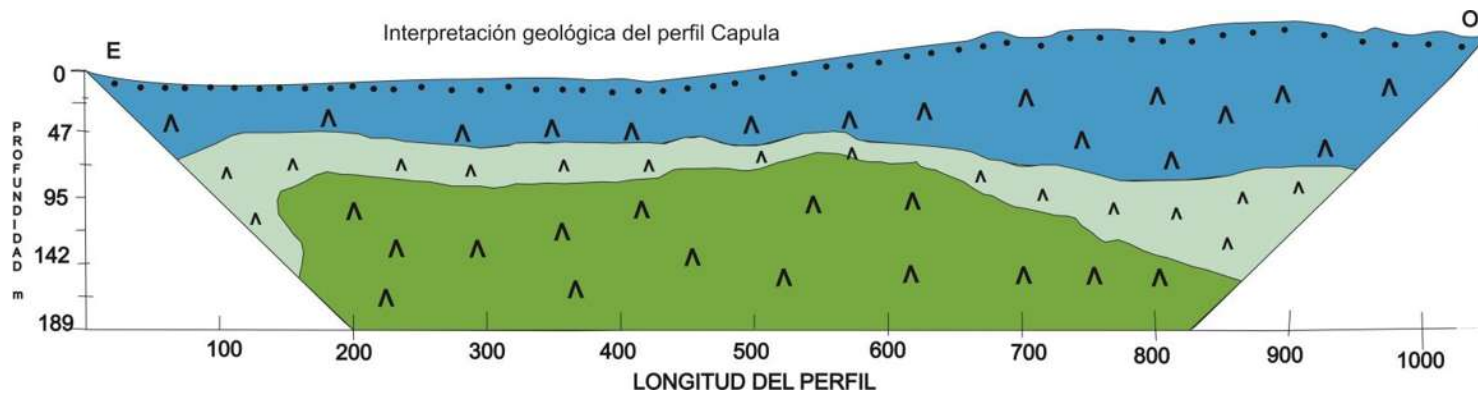


Figura 77.- Interpretación geológica del perfil 2 Capula. Se delimitan tres estratos marcados con color azul, verde bajo y verde delimitados de acuerdo a la diferencia de resistividades y asociados a rocas andesíticas con diferentes características.

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.1 Discusión

Una de las principales aportaciones de este trabajo, es la cartografía a detalle a escala 1: 20,000, ya que los mapas que existen en la zona solo han delimitado algunas unidades o se ha cartografiado de manera muy general a escalas de menor detalle. En este trabajo se delimitó cada unidad y reconocieron las unidades que anteriormente no habían sido descritas, tal es el caso del domo El Rodeo y Dacita Itzícuaru, además de aportar datos de porosidad por fisuración y movimiento del flujo subterráneo en las unidades acuíferas analizadas.

De las unidades litológicas existían trabajos petrográficos que describían a la unidad El Águila y El Remolino (Cardona-Melchor, (2015), la unidad Tetillas (Cisneros-Máximo, 2016) y la Ignimbrita Atecuaro (Gómez-Vasconcelos, 2012) por lo que se decidió no realizar petrografía de esas zonas, sin embargo fueron recolectadas y descritas muestras de roca que mineralógicamente corresponden a basaltos, andesitas e ignimbritas que son las rocas que dichos autores tenían confirmadas en estas unidades. Aunque la petrografía que se analizó en este estudio correspondió a pocas secciones delgadas y eso resulte insuficiente para trabajos petrográficos o mineralógicos, ayudo a determinar litologías y características de una zona, como es el caso de la unidad Andesítica y Conos de Escoria Concepción que Cisneros-Máximo (2016) denomina como Cono andesita-basáltica el Pelón, la considera dentro de la unidad Tetillas y asigna una edad correspondiente al Pleistoceno Medio la cual se toma en este trabajo; sin embargo en este estudio las descripciones de muestra de roca y la muestra petrográfica (9 Jardín) correspondieron a andesitas. Para el caso de la unidad Andesita Capula, en el que datos de un pozo cercano (Capula 2) la denominan como una roca basáltica, y en el que la muestra petrográfica (14 Capula) sugieren una roca andesítica. Respecto a la unidad Conos de escoria Tacícuaru que hacia la parte baja cuenta con rocas basálticas, aunque no fue posible delimitar dichos afloramientos se consideran los datos geofísicos de Israde-Alcantara y Tosca-Delgado (1997), que infieren en la zona del basurero de Morelia una colada basáltica y materiales piroclásticos, para esta unidad se toma la edad asignada por Cisneros-Máximo (2016) dada por posición estratigráfica correspondiente al Pleistoceno Tardío-Holoceno aunque no describe mineralógicamente esta unidad. Lo anterior es

precisamente una de las limitaciones del trabajo, la imposibilidad de encontrar afloramientos o el acceso a ellos debido a que la zona se encuentra más construida de lo que muestran los datos del INEGI.

Las descripciones mineralógicas de Gómez-Vasconcelos, (2012) sobre la Ignimbrita Atecuaro la describen como una roca con una mineralogía de sanidina, cuarzo, flogopita, plagioclasa y cristales de biotita, rodeado por una matriz vítrea; mineralógicamente son similares a las muestras de roca descritas en Cointzio y El Edén correspondientes a dicha unidad, pero que también corresponden a la descripción de las muestras de la unidad Ignimbrita El Rodeo las cuales son rocas félsicas, de color rosa, con una mineralogía de cuarzo, fiammes y plagioclasa. Estas evidencias sugieren que son parte de la misma unidad que probablemente fue cubierta en el área de lo que hoy es la colonia San Javier Xanamoro, una parte de la Mintzita y San Antonio Parangare por las lavas de la unidad El Remolino en una pequeña porción hacia el sureste del domo el Rodeo y de la Lava Basáltica el Divisadero en el Pleistoceno Medio y Pleistoceno Tardío respectivamente. La ignimbrita El Rodeo de acuerdo a la interpretación del modelo digital de elevaciones (MDE) y al tipo de roca se clasificó como un domo y no como un cono de escorias como lo indica el mapa de Israde-Alcántara (2009) o como un cono basáltico como sugiere Cisneros-Máximo (2016).

Las fracturas de las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio no fueron consideradas para realizar el análisis de porosidad por fisuración debido a que el fracturamiento es propio del vulcanismo de dichas lavas; es decir no son consideradas fracturas tectónicas, por consiguiente no tenemos la certeza de la profundidad que alcancen ni de que estas aporten al acuífero. Este hecho hizo considerar el fracturamiento de las unidades Andesita Mil cumbres e Ignimbrita Atecuaro que son los acuíferos de los que se extrae actualmente el vital líquido.

Aunque el acceso a un afloramiento importante de la Ignimbrita en la zona de Santa María impidió tomar más datos estructurales de los que se tenían contemplados.

Las direcciones del movimiento del flujo subterráneo representadas en las rosetas, como lo evidencia la andesita Mil Cumbres con dirección NE-SO y la Ignimbrita de Atecuaro con direcciones de movimiento subterráneo NE-SO y E-O corresponden a las indicadas por Garduño-Monroy *et al.*, (2014) en su mapa de flujo subterráneo. También corresponden a la dirección del fallamiento regional E-O en la ignimbrita con el sistema Morelia-Acambay y

la dirección NE-SO de la andesita a los sistemas de fallas de Cuitzeo (Quintero-Legorreta, 2002 y Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

Referente a los perfiles geofísicos, el perfil 2 Capula no tiene antecedentes cercanos con los que pudieran ser comparados. Para el perfil 1 Villas del Pedregal existen antecedentes de Tosca-Delgado, (2016) quien realizó una tomografía eléctrica con arreglo electródico tipo Schlumberger con 28 electrodos y una longitud de línea de 135 m en comparación a la línea de este perfil que utilizó el mismo arreglo electródico, pero 82 electrodos y una longitud de 2,100 m; ambos perfiles en dirección N-S se llegan a empalmar en su parte sur. Los resultados obtenidos reflejan simultaneidad de resistividades en los primeros metros y son correlacionados con basaltos, aunque los perfiles de Tosca-Delgado no alcanzan una profundidad mayor a los 30 m se puede interpretar un modelo de capas a mayor detalle, lo que no ocurre con el perfil de este trabajo en donde solo pueden ser interpretadas capas mayores a 25 m de espesor. En cuanto a la posible evidencia de la falla La Colina en la parte sur del perfil Villas del Pedregal, se señala que si todo el perfil corresponde a basaltos de la unidad el Divisadero podría evidenciar que la falla continuó hasta cortar esta unidad, posteriormente ceso su movimiento y por ello no es observada en superficie.

Los niveles de saturación de agua inferidos en ambos perfiles se correlacionan con los datos piezométricos de Pérez-Villareal, (2018) para la zona de Villas del Pedregal se ubica un nivel de saturación a partir de los 82 m mientras que el nivel piezométrico se ubica a partir de los 90 o 100 m. El perfil Capula tiene un nivel de saturación a partir de los 50 m y un nivel piezométrico a partir de 48 m.

## 6.2 Conclusiones

El mapeo a detalle de la zona de estudio permitió definir 11 unidades litológicas. Al menos tres de ellas definidas en este trabajo (Andesita Capula, Dacita Itzicuario e Ignimbrita el Rodeo). La mineralogía de la ignimbrita el Rodeo, su textura y color son características que permiten correlacionarla con la Ignimbrita de Atécuaro que aflora en Cointzio y el Edén. El estudio petrográfico permitió identificar y clasificar a las 5 rocas que se laminaron, confirmó a la ignimbrita el Rodeo como parte de la unidad ignimbrita de Atécuaro. También

permitió identificar a la dacita Itzícuaru como una unidad que no había sido descrita y de la que se han realizado las primeras observaciones y descripciones.

De acuerdo con los datos de apertura de las fracturas que se muestran en las gráficas de las unidades acuíferas se evidencia un mayor porcentaje de aperturas de 0.40 mm y 10 mm en la andesita e ignimbrita respectivamente. Estos valores tan desiguales son la causa de que la permeabilidad de la ignimbrita sea mayor en comparación de la unidad andesítica, a pesar de que fueron realizadas más ventanas de muestreo en la andesita y por consiguiente se tiene un mayor número de datos que en la ignimbrita.

Las longitudes de fracturas tienen un porcentaje similar, la unidad andesítica de 11-20 cm seguido de 21-30 cm mientras que la unidad ignimbrítica de 21-30 cm seguido de 11-20 cm, por lo que pueden considerarse como rangos mayoritarios a esas longitudes para ambas unidades.

Las rosetas que indican el movimiento del flujo subterráneo indican que este sigue la tendencia del fallamiento regional.

De las fallas delimitadas o inferidas, las de dirección NE-SO son las que corresponden a la alineación de los conos; la falla que alinea los conos de escoria de Tacícuaru junto con el cono de la Concepción. Las fallas con dirección E-O como la falla Cointzio y la falla Cerritos pertenecen al sistema regional Morelia-Acambay.

Con los perfiles geofísicos se alcanzó una profundidad de 315 m y 189 m para el perfil Villas del pedregal y Capula respectivamente, estos perfiles ayudaron a interpretar la zona de basaltos y andesitas saturados en agua, además de evidenciar la posible continuación de la falla La Colina hacia la unidad basáltica.

### 6.3 Recomendaciones

- Realizar petrografía y de un mayor número de muestras de la Unidad Ignimbrita el Rodeo y la unidad Dacita Itzícuaru para determinar con mayor certeza los porcentajes de su mineralogía.
- Obtener un mayor número de medidas de datos estructurales de fracturas en diferentes afloramientos de las unidades acuíferas Andesita Mil Cumbres e Ignimbrita de Atécuaru a fin de contar con una mayor población estadística de datos.

- Realizar otro perfil geofísico en la zona el fraccionamiento Villas del Pedregal, de ser posible 600-800 m hacia el este para observar el comportamiento resistivo de los materiales en esa zona a fin de tener otra evidencia para comprobar o refutar la idea de la continuación de la falla La colina.
- El método geofísico que se recomienda es sísmica de refracción para obtener mayor detalle de las coladas basálticas y una evidencia más clara de la falla La Colina.

## 7.- Referencias bibliográficas

Aracil E., Porres J., Espinosa A., Maruri U., Valles J., García L., Ibáñez S., 2005, Aplicación de la tomografía eléctrica para la caracterización de un deslizamiento de ladera en un vertedero, VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, Valencia España, 21-25 junio, 8.

Arias-Salguero E., 2002. Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica, Revista geológica de América Central, 11-20.

Arreguín J. 1998, Aportes a la historia de la geohidrología en México 1890 - 1995, CIESAS-Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C, 102-111.

Arreygue-Rocha E, Garduño-Monroy V.H, Canuti P., Casaglie N., Iotti A, Chiesa S. 2002, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19 (2), 91-106

Auge M, 2008, Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea, Universidad de Buenos Aires Argentina, 30 p.

Ávila-Olivera J.A, Garduño-Monroy VH, 2007, Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia, Revista Ciencia Nicolita 46, 18.

Barker, R., 1989, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, 54 (8) 1031-1037.

Barrera-Mendoza J.A, 2015, Empleo del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica para la ubicación de un sitio de recarga de acuífero en Xochimilco, (tesis para obtener el grado de ingeniero geofísico), Instituto de Ingeniería, UNAM, 62.

Bermejo G, 2018, Análisis geométrico y fractal de fracturas geológicas en los campos geotérmicos del lago de Cuitzeo, (tesis para obtener el grado de maestro en geociencias y planificación del territorio), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, INICIT, 132.

Candel R, 1997, Geología práctica, Ediciones Omega, Barcelona España, 448.

Cardona-Melchor S, 2015. Estudio vulcanológico del Complejo Volcánico el Águila y los domos La Taza-La Nieve-El Burro, centro-norte de Michoacán, (Tesis para obtener el título de maestría en geociencias y planificación del territorio) Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 137.

Cisneros-Máximo G, 2016, Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas-Quinceo, Morelia, Michoacán. Propuesta de cartografía jerárquica. Universidad Nacional Autónoma de México, maestría en geografía, 150.

CONAGUA, (Comisión Nacional del agua) 2011, Estadísticas del agua en México, capítulo 8 agua en el mundo, 32.

CONAGUA, (Comisión Nacional del agua) 2015, Actualización de la disponibilidad anual de agua en el acuífero Morelia-Querendaro (1602). Estado de Michoacán, publicada en el Diario Oficial de la Federación, Subdirección general técnica, gerencia de aguas subterráneas, subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos, 32.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) Revista Numeragua, 2016, 98.

CONAGUA (Comisión Nacional del agua), SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2014, Estadísticas del agua en México, 298.

CONAGUA (Comisión Nacional del agua), SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2015, Estadísticas del agua en México, 298.

CONURBA (Consultoría y gestión urbana y ambiental), 2012, Programa parcial de desarrollo urbano de la zona suroeste de Morelia (La Mintzita) Morelia, Michoacán, 31.

Clarke, R. y King, J. 2004, The Water Atlas. The New Press, Capítulo 3.

Dahlin, T., Loke, M.H., 2001. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling, Journal of Applied Geophysics, 38, 237-249.

Daza F.A, 2012, Métodos geoelectricos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales, Tesis para obtener el título de geofísico, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Chile, 256.

Foster S., Nanni M., Kemper K., Garduño H, Tuinhof A. 2006, Gestión sustentable del agua subterránea, conceptos y herramientas, serie de notas informativas. Banco mundial, 6.

Galván-Mancilla S.M, 2013. Estudio de prospección geohidrológica mediante métodos geológico-geofísicos para la prospección de agua subterránea en la Huerta Santa Catarina, municipio de Linares, Nuevo León, México, (Tesis para obtener el grado de maestría en ciencias con especialidad en ingeniería ambiental), Facultad de ingeniería civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, 96.

García A.N, 2012, Caracterización hidrogeológica de un sector del acuífero del Valle de Iguala, Guerrero, (tesis para obtener el grado de ingeniero geólogo), Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de ingeniería, 139.

Garduño-Monroy V.H, Rodriguez-Torres G.M, Israde-Alcantara I, Arreygüe E, Canuti P, Chiesa S, 2000, Efecto del clima (El niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia, Geos. 19, (2) 84-93.



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

Garduño-Monroy V.H, Medina-Vega V.H, Israde-Alcantara I, Hernández-Madrigal V.M, Ávila-Olivera J.A, 2010, Unidades geohidrológicas de la región de Morelia-Cuitzeo, 4.

Garduño-Monroy V.H., Giordano Ni., Ávila Olivera J.A., Hernández Madrigal V.M., Nateras A, Díaz E.J. 2014, Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para una correcta planificación del territorio, 26.

Garduño-Monroy V.H, 2017. Estudio de fracturamiento-fallamiento y campo de deformación actual y modelos numéricos apoyados con sísmica y geofísica de exploración en los campos geotérmicos de Cuitzeo, Michoacán, Rancho Nuevo, Guanajuato, Las Derrumbadas, Puebla y volcán Tacana, Chiapas, Instituto de geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Gómez Vasconcelos M.G., Garduño-Monroy V.H., Macías J.L., Layer W., Benowitz A., 2015. The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128-147.

Gonzales-Miranda V, 2018, Disponibilidad de metales traza en suelos y agua de la comunidad de Capula, Michoacán, (Tesis para obtener el grado de maestría en geociencias y planificación del territorio), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, INICIT, 158.

Griffiths, D.H., Turnbull, J. y Olayinka, A.I., 1990, Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. *First Break* 8, 121-129 .

Hernández Madrigal V.M, Garduño-Monroy V.H, Ávila-Olivera J.A. 2011, Atlas de peligros geológicos de la ciudad de Morelia, Michoacán: Estandarización del documento, actualización, cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento. Secretaria de desarrollo social, programa hábitat, H. ayuntamiento de Morelia, Michoacán, dirección de protección civil y bomberos de Morelia. 55.

Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, 2016, Agua y Empleo, Paris Francia, 164.

Istrade-Alcantara I, Tosca-Delgado A, 1997, Informe de la exploración geofísica practicada en el relleno sanitario del municipio de Morelia, exploraciones geológicas y geofísicas, 10.

Istrade-Alcantara I, Buenrostro-Delgado O, Carrillo A. 2005, Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central México, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55, 11.

Israde-Alcantara I, Buenrostro-Delgado O, Garduño-Monroy V.H, Hernandez-Madriral V.M, Lopez-Granados E, 2009, Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, Norte del Estado de Michoacán, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 61, (2) 203-211.

Lisle J., 2004, Geological structures and maps, Third edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 115.

Loke, M.H. 1994. RES2DINV, Rapid 2D resistivity and IP inversion using least squares methods, User manual, Austin Tex., Advanced Geosciences, Inc., 66.

Marvin-Corriols M, 2003, Estudios geofísicos e hidrogeológicos para la caracterización del acuífero León-Chinandega, centro de investigaciones geocientíficas CIGEO, UNAN-Managua. 10.

Morales-Cacique E, Escolero O.A, Arce J.L, 2014, Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México, Revista mexicana de ciencias geológicas.31, (1), 64-75.

Moreno-Sánchez G, Garcia-Cabrejo O, 2006, Quantitative Characterization of Fracture Patterns with Circular Windows and Fractal Analysis, Universidad Nacional de Colombia, Geología colombiana (31), 31.

Moreno Vázquez J.L, 2000, Conocimiento y estudios sobre el agua subterránea en la costa de Hermosillo, Región y Sociedad, 11, (20), 1-36.

Nelson A.R, 2001, Geologic analysis of naturally fractured reservoirs, Second edition, Elsevier, 323.

Orellana E, 1982, Prospección Geoeléctrica en corriente continua, Paraninfo, segunda edición, Madrid, España, 1, 24-72.

Organista-Mota R, 2016, Estudio de calidad de agua subterránea y su relación con la salud pública en la región Capula-Cointzio. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Inédita, 127.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2003, Paris, Francia

Pasquaré G, Ferrari L, Garduño-Monroy V.H, Tibaldi A, Vezzoli L, 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, México, Geological Society Of América, Map and Chart series MCH072, dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Via Mangiagalli 34, Milano, Italy, 22.

Pedraza-Pérez A.C, 2018, Vulnerabilidad del agua subterránea al poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán, (tesis para obtener el grado de maestría en geociencias y planificación

del territorio), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, asesor Ávila-Olivera Jorge Alejandro, Morelia Michoacán, 136.

Pérez-Villareal J, 2018, Estudio hidrogeológico del sistema acuífero ubicado al poniente de Morelia, (tesis para obtener el grado de doctor en ciencias biológicas), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de investigaciones sobre los recursos naturales (INIRENA) asesor Ávila-Olivera Jorge Alejandro, Morelia Michoacán, 159.

Plata J, Rubio Sánchez-Aguililla F.M, López J, López J.C, Marcuello A, Ledo J. L, Quearlt P, Ullod T, Peña J.A, Ribera F, 2006, Tomografía geoelectrica: Desarrollo para la caracterización de acuíferos, Universidad de Barcelona, Instituto geológico y minero de España, 176.

Pranzini G. 1991, Hydrogeologic balance of an overexploited aquifer and corrective measures for the water resources management, resumen del congreso XXII "Aquifer overexploitation" Canary Island, Spain, 227-229.

Pranzini, G. 2000, Elementi di idrogeologia: Firenze, Italia, Università degli Studi di Firenze, Apuntes del curso de Geociencias.

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) 2016, Informe sobre desarrollo humano, Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua. 122.

Quintero-Legorreta O, 2002, Análisis estructural de fallas potencialmente activas, Boletín de la sociedad geológica mexicana, tomo LV, (1), 1-11.

Ramírez N, 2010, Caracterización de fallas y fracturas mediante tomografía eléctrica utilizando electrodos de acoplamiento capacitivo, (Tesis para obtener el grado de ingeniero geofísico), Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de ingeniería, 78.

Ríos-Sánchez M, 2009 Hidrogeología de acuíferos fracturados, conceptos básicos, 7.

Rodríguez C, Ochoa A, 1989, Estudio geoelectrico del sistema acuífero de la cuenca de México, Geofísica. Internacional., 28 (2), 191-205.

Sáenz-Pita M. R, 2000, Colección petrográfica de rocas ígneas como un apoyo a la enseñanza de la petrología en geología, Tomo I mineralogía óptica y minerales ígneos, (Tesis que para obtener el título de ingeniero geólogo), Universidad Autónoma de Guerrero, Escuela Regional de Ciencias de la Tierra, 178.

Sahuquillo-Hernandez A, 2009, La importancia de las aguas subterráneas, Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, España, 103, (1) 97-114.

Salgado-Pareja J, Contreras E, Vizcarra M, 2002, Aplicaciones de la tomografía geoelectrica 2-D al estudio del subsuelo, Ensayos: Temas de ciencia y Tecnología, 6, (17), 11-16.

Santamaría J. Becerra M. 2003, Los conflictos por el agua en México, Gaceta ecológica, 67, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 61-68. ISSN 1405-2849

Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, Comisión Nacional del agua CONAGUA, 2014, Estadísticas del agua en México, 242.

Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, Comisión Nacional del agua CONAGUA, 2015, Numeragua, 94.

Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, Comisión Nacional del agua CONAGUA, Atlas del agua en México, 2015, 138.

Sellés-Martínez J, 2014, Cartografía geológica, Levantamiento geológico, One Geology, 25.

Sierra L, Weinzettel P, Diedrich S, Bea S, Cacciabue L, 2016, combinación de tomografía eléctrica y perfilaje de pozo para caracterizar variaciones laterales del acuífero pampeano, IX congreso argentino de hidrogeología y VII seminario hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea, Catamarca, Argentina, 9.

Tosca-Delgado A, 1997, Informe de la exploración geofísica practicada en el relleno sanitario del municipio de Morelia, exploraciones geológicas y geofísicas, 10.

Tosca-Delgado A, 2016, Estudio geológico y geofísico del predio Villas del Pedregal municipio de Morelia en el estado de Michoacán, exploraciones geológicas y geofísicas, 18.

Tosca-Delgado A, 2017, estudio geoeléctrico efectuado para la comunidad de San José Itzicuaro perteneciente al municipio de Morelia en el estado de Michoacán, exploraciones geológicas y geofísicas, 15.

Verduzco-Cedeño L.A, 2010, Evaluación de la contaminación al acuífero, en la región Morelia-Capula, causada por el impacto de la infiltración de lixiviados generados por el basurero municipal de la ciudad de Morelia, (tesis para obtener el grado de maestría en geociencias y planificación del territorio), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, asesora Israde-Alcanta Isabel, Morelia Michoacán, 182.

Weinzettel P, Dietrich S, Varni M, 2009, Utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamientos electródicos para la caracterización de la zona no saturada, Estudios en la zona no saturada del suelo. 9 Barcelona, 8.

Weinzettel P, Dietrich S, Varni M, Sierra L, 2017, Hydrogeological investigation in a valley by means of the application of geoelectrical methods, Asociación argentina de geofísicos y geodestas, 13p.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. París, UNESCO. 164.

Zúñiga R, 2011, Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje poniente de la ciudad de Guatemala, tesis para obtener el título de ingeniera geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, Facultad de ingeniería, 90p.

## 8. Anexos

### Puntos GPS de las muestras de roca recolectadas en la zona de estudio

No.	X	Y	Z	Roca	Nombre de la muestra
1	261633	2173182	1893	ignimbrita	Cointzio
2	261118	2176229	1954	Dacita?	Itzícuaró
2A	260994	2176244	1927	Dacita?	2A-Itzícuaró
3	263918	2174306	1906	ignimbrita	Edén
5	259771	2179792	2072	Andesita basáltica	nubes
6	258337	2179450	2024	Andesita basáltica	Concepción
7	261433	2180371	2056	Andesita basáltica	Mor
8	262551	2178071	1896	Andesita basáltica	Hacienda
9	257524	2179301	2012	andesita	jardín
10	256758	2180669	2164	andesita	concha
11	254669	2180790	2097	andesita	Cuto
12	252257	2180175	2130	andesita	Capula 1
13	251702	2178704	2095	andesita	Capula 2
14	249682	2178545	2119	andesita	Capula N
15	252730	2179227	2073	andesita	joyitas
16	256658	2173871	2015	Andesita	San Nico
17	256298	2173656	2072	andesita	san Nico 2
18	251837	2174638	2338	Andesita basáltica	Tacícuaró
19	249697	2175784	2204	Andesita basáltica	Sur de Capula
20	256315	2177077	1998	basalto	villa magna
21	257845	2176658	1969	Basalto	Villas del pedregal
22	261552	2174450	1890	Basalto	Mintzita
23	258691	2175515	1967	Basalto	Villas 2
24	254730	2174110	2136	Andesita basáltica	Cuanajillo
25	261052	2176702	1796	Basalto	basalto rodeo
26	260786	2176363	1916	Dacita muy deleznable	Itzi
27	260866	2175973	1936	Dacita?	Itzícuaró
28	259764	2174867	1968	ignimbrita	Ignimbrita el rodeo

## Descripción de muestras de mano

Muestra 1 Cointzio Ignimbrita	Roca félsica, color rosa, de textura afanítica, con una mineralogía de cuarzo vítreo, translucido, fragmentos líticos de color rojizo de forma anhedral del tamaño de 1 a 5 mm y feldespatos potásicos color gris claro, pómez alargada y fibrosa de color amarillo a blanco.
Muestra 2 Itzicuaro Dacita	Roca félsica color gris claro, textura afanítica, con una mineralogía de hornblendas alargadas? (tabulares) color negro Cuarzo transparente, plagioclasa gris, líticos color rojizo.
Muestra 3 Edén Ignimbrita	Roca félsica color gris claro a blanco, textura afanítica, con fragmentos de pómez de 1 a 2 cm, color amarillo de textura fibrosa; cuarzo translucido, textura vítrea color gris claro y blanco.
Muestra 5 Campo Nubes Andesita basáltica	Roca máfica, color gris, textura afanítica, este punto tiene dos muestras una vesiculada y otra con escasas vesículas, con una mineralogía de olivinos color verde y piroxenos color miel, inmersos en una matriz fina.
Muestra 6 Concepción Andesita basáltica	Roca máfica, color gris, textura afanítica, roca con pocas vesículas, presenta una mineralogía compuesta de piroxenos color miel, olivinos color verde claro, ambos de forma anhedral, inmersos en una matriz fina.
Muestra 7 Morelia Andesita basáltica	Roca máfica, color gris, textura afanítica, sin vesículas, presenta una mineralogía de piroxenos color miel y olivinos color verde claro inmersos en una matriz fina color oscuro.
Muestra 8 Hacienda Andesita basáltica	Roca máfica, color gris de textura afanítica con vesículas, presenta una mineralogía de piroxenos color miel y olivinos color verde claro, con minerales secundarios dentro de las vesículas.
Muestra 9 Jardín Andesita	Roca máfica, color gris claro de textura afanítica, masiva, sin vesículas, con una mineralogía de piroxenos color verde claro, inmersos en una matriz color oscuro. Hay otras muestras color rojizo muy vesiculadas, muy ligeras, probables basaltos, no se observa una mineralogía clara.
Muestra 10 Concha Andesita	Roca máfica, color gris oscuro, masiva sin vesículas, de textura afanítica, con una mineralogía de piroxenos color verde muy claro a color miel, de forma tabular y formas subhedrales, inmersos en una matriz fina de color gris.
Muestra 11 Cuto Andesita	Roca máfica, color gris claro, masiva sin vesículas, de textura afanítica con una mineralogía de piroxenos color verde claro a oscuro algunos de forma tabular, inmersos en una matriz fina en la cual no se distinguen minerales.
Muestra 12 Capula 1 Andesita	Roca máfica de color gris con vesículas pequeñas, de textura afanítica con una mineralogía que no se alcanza a distinguir con la lupa.

Muestra 13 Capula 2 andesita	Roca máfica de color gris con vesículas pequeñas, de textura afanítica con una mineralogía escasa de piroxenos color verde claro inmersos en una matriz en la que no se distinguen los minerales.
Muestra 14 Capula N Andesita	Roca máfica color gris, sin vesículas, de textura afanítica, con una mineralogía de piroxenos color verde oscuro y algunos de color miel, poca presencia de cuarzo translucido.
Muestra 15 Joyitas andesita	Roca máfica de color gris, a color rojizo rosa, por intemperismo, de textura afanítica, con presencia de vesículas pequeñas y muy cerradas, con una mineralogía de posibles plagioclasas color blanco y translucido que se va rápidamente con navaja y minerales color café claro piroxenos?
Muestra 16 San Nico Basalto	Roca máfica de color gris, con textura afanítica, roca muy vesiculada con oquedades de hasta 1cm presenta una mineralogía de piroxenos color verde claro inmersos en una matriz que no es distinguible con la lupa.
Muestra 17 San Nico 2 Basalto	Roca máfica de color gris con textura afanítica, muy vesiculada pero oquedades muy pequeñas (milimétricas) presenta una mineralogía de piroxenos color verde claro y color miel, posiblemente olivinos color verde claro y sin forma aparente y minerales blancos que se rayan con navaja por lo que considero plagioclasas.
Muestra 18 Tacícuaro Andesita Basáltica	Roca máfica de color gris con textura afanítica, muy vesiculada, con una mineralogía escasa de minerales color verde claro posibles piroxenos.
Muestra 19 Sur de Capula Andesita Basáltica	Roca máfica de color gris con textura afanítica de vesículas, presenta una mineralogía de piroxenos color verde claro y color café de tamaño diminuto casi imposible de ver hasta con la lupa.
Muestra 20 Villa Magna Basalto	Roca máfica color gris, con textura afanítica, roca con vesículas, con una mineralogía de plagioclasas color blanco, algunas grises o translucidas que son rayadas con navaja y en menor cantidad piroxenos color verde claro.
Muestra 21 Villas del pedregal Basalto	Roca máfica color gris de textura fanerítica, con vesículas grandes y pequeñas con una mineralogía que se nota a simple vista, piroxenos color verde claro y plagioclasas translucidas que se rayan con navaja.
Muestra 22 Mintzita Basalto	Roca máfica de color gris, de textura afanítica masiva sin vesículas, con una mineralogía de piroxenos color verde muy escasos.
Muestra 23 Villas 2 Basalto	Roca máfica de color gris de textura porfídica con vesículas, presenta una mineralogía que se nota a simple vista, piroxenos color verde claro de 0.2 a 8 mm y plagioclasas translucidas que se rayan con navaja.

Muestra 24 Cuanajillo Andesita Basáltica	Roca máfica color gris, de textura afanítica con vesículas muy pequeñas (milimétricas) y muy redondeadas, con una mineralogía de piroxenos color amarillo ámbar y plagioclasas grises y translucidas.
Muestra 25 Basalto Rodeo	Roca máfica color gris de textura porfídica, con vesículas grandes y pequeñas con una mineralogía que se nota a simple vista, piroxenos color verde claro y plagioclasas translucidas que se rayan con navaja.
Muestra 26 Itzi Dacita	Roca muy deleznable color café, terrosa, se observan como capas que pudieran ser laminaciones color gris y café con tamaño de grano de arenas finas o medias, posible mineralogía de mica moscovita? Y cuarzos blancos tipo lechosos.
Muestra 27 Itzicuaró Dacita	Roca félsica color rosa a gris, muy consolidada, de textura fanerítica, con una mineralogía de hornblenda? Color negro a gris de forma alargada, líticos que miden hasta 1.5 cm, cuarzo translucido.
Muestra 28 ignimbrita el rodeo	Roca félsica color rosa y rosa claro una muestra más consolidada que otra de textura fanerítica o porfídica, con una mineralogía de plagioclasas y feldspatos color gris a rosa muy claro que se rayan con navaja, también contiene cuarzo translucido.