



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
SEPI-CIENCIAS DE LA TIERRA

“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA
ZONA DE RECARGA DE LOS MANANTIALES
DE LA REGIÓN PURÉPECHA DE CHERÁN,
MICHOACÁN, MEX.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRO EN CIENCIAS
EN: “GEOCIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN DE LOS RECURSOS
NATURALES”

PRESENTA:

BENÍTEZ OJEDA CARLOS MAURICIO

ASESORES:

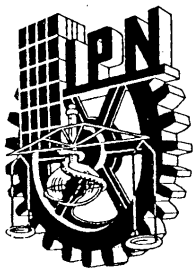
M. EN C. MONDRAGÓN GUZMÁN RODRIGO

DR. SILVA GARCÍA JOSÉ TEODORO



CIUDAD DE MÉXICO

2022

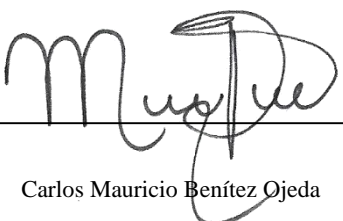


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 15 del mes diciembre del año 2021, el (la) que suscribe Carlos Mauricio Benítez Ojeda alumno (a) del Programa de maestría en geociencias y administración de los recursos naturales con número de registro A190289, adscrito a SEPI de la ESIA Unidad Ticomán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Rodrigo Mondragón Guzmán y cede los derechos del trabajo titulado caracterización geológica de la zona de recarga de los manantiales de la región purépecha de Cherán, Michoacán, Mex, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección cbenitezo1100@alumno.ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Carlos Mauricio Benítez Ojeda



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-13
REP 2017

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, 17 de Mayo del 2021

El Colegio de Profesores de Posgrado de ESIA UNIDAD TICOMÁN en su Sesión
(Unidad Académica)

extraordinaria No. 4 celebrada el día 28 del mes mayo de 2020 conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Benitez	Apellido Materno:	Ojeda	Nombre (s):	Carlos Mauricio
--------------------------	---------	--------------------------	-------	--------------------	-----------------

Número de registro: A 1 9 0 2 8 9

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Caracterización geológica de la zona de recarga de los manantiales de la Región Purépecha de Cherán, Michoacán, Méx.

Objetivo general del trabajo de tesis:

Caracterizar los rasgos geológicos de la zona de recarga de los manantiales de la Región Purépecha de Cherán, con la finalidad de identificar las particularidades que los originan, sus relaciones con acuíferos locales, y correlación con el área de descarga.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán 2° Director: Dr. José Teodoro Silva García
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

Fuentes bibliográficas, medios electrónicos y trabajos de investigación de referencia.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis
M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

2° Director de Tesis (en su caso)
Dr. José Teodoro Silva García

Aspirante
Carlos Mauricio Benitez Ojeda

Presidente del Colegio
Dr. Arturo Ortiz Ubilla



SECCIÓN DE ESTUDIOS
DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: para examinar la tesis titulada:

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Benitez	Apellido Materno:	Ojeda	Nombre (s):	Carlos Mauricio
-------------------	---------	-------------------	-------	-------------	-----------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 9 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*
El porcentaje de semejanza es muy bajo, y está dentro de los parámetros establecidos.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

El documento cuenta con los requisitos establecidos por la Sección de Estudios de Posgrado: original, escrito individualmente, cita a referencias bibliográficas, y demuestra la capacidad del alumno para analizar y proponer alternativas de solución a problemas del área respectiva.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Director de Tesis
M. en C. Rodrigo Mondragón Guzmán

Dr. Ezequiel Rojas Hernández

Dr. Daniel Romo Romero Rico

2° Director de Tesis (en su caso)
Dr. José Teodoro Silva García

Dr. Francisco Estrada Godoy

Dr. Arturo Ortiz Ubilla
Nombre completo y firma
**PRESIDENTE DEL COLEGIO
PROFESORES**

AGRADECIMIENTOS

Al Señor Dios...

Por todo lo que me ha otorgado...

A mi madre...

Por toda la sabiduría transmitida...

Daisy, Scarlett, Yuly, Reina...

Por su amistad incondicional...

César, Irán, Alex, Miguel, Jesús, Javier, Julio...

Por su orientación...

Graciela, Lupita, Francisco, Liam...

Por su dedicación...

Guru Paramadvaiti, Dhamodhar, Guru Parampara...

Por su esfuerzo...

Lupe, Aarón, Paco, Saúl...

Por sus enseñanzas...

M. en C. Rodrigo Mondragón, los drs. Ezequiel Rojas, Daniel Romo, Teodoro Silva, Francisco Estrada, e Ing. Guillermo Tarango...

Por su apoyo...

Y al resto...

Que siempre estarán ahí... aunque la eternidad fallara...

DEDICATORIA

Al Señor Dios...

A mi madre...

Familia...

Amigos...

Profesores...

Y a los exploradores que dieron su vida en nombre de la ciencia...

CONTENIDO

Resumen	11
Abstract	12
INTRODUCCIÓN.....	13
Meseta Purépecha	13
Región Cherán	14
Justificación.....	15
Planteamiento del problema.....	16
Objetivos	17
General.....	17
Específicos	17
Hipótesis	17
Metodología	18
Investigación preliminar	18
Trabajo de campo.....	19
Trabajo de laboratorio.....	20
Percepción remota.....	20
Trabajo de gabinete.....	21
Generalidades.....	21
Localización del área estudiada.....	21
Clima, precipitación y vegetación.....	22
Hidrología	22
Geomorfología.....	23
1. MARCO TEÓRICO.....	26
Agua	26
Hidrología.....	26
Hidrogeología.....	26
Geohidrología.....	26
Acuíferos.....	27
De acuerdo a su ambiente geológico.....	28
De acuerdo a sus características hidrológicas.....	28

De acuerdo a su textura.....	29
Manantiales.....	29
Bryan (1919).....	29
Meinzer (1917)	34
Meinzer (1923)	34
2. MARCO GEOLÓGICO	36
Geología Regional.....	36
Límite Convectivo Pacífico — Norteamérica	36
Arco Magmático de la Sierra Madre del Sur.....	36
Arco Magmático de la Faja Volcánica Transmexicana	40
Geología Local	44
Subprovincia Sierras y Bajíos Michoacanos	44
Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato.....	45
3. ESTRATIGRAFÍA.....	51
Complejo Mil Cumbres	51
Formación El Pino.....	52
Formación Cherán.....	52
Formación Cheranástico	53
Basamento.....	53
4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	57
5. GEOHIDROLOGÍA.....	61
Manantiales.....	62
Acuíferos.....	66
6. DISCUSIÓN.....	76
Manantiales.....	76
Acuíferos.....	76
Pozos	77
Ollas captadoras pluviales.....	78
Otras maneras de resolver la escasez	78

Productividad de pozos profundos.....	81
Marco jurídico	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
Conclusiones.....	89
Recomendaciones.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo general la caracterización de rasgos geológicos presentes en la Región Cherán, con la finalidad de identificar las particularidades que originan una serie de 16 manantiales de agua dulce y bajo caudal, y sus relaciones con los acuíferos locales. El área de estudio se localiza en la zona de recarga hídrica más importante del Estado de Michoacán, conocida como Meseta Purépecha (Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato) que, a pesar de los rangos de precipitación anuales comprendidos entre los 1,000 y 1,200 mm, presenta un fenómeno de escasez.

Dicho acontecimiento es atribuido a la alta porosidad y permeabilidad de los suelos, así como alto fracturamiento regional, ocasionando que el agua pluvial se infiltre inmediatamente tras las lluvias y sea transmitida a las fosas tectónicas circunvecinas, originando una serie de lagos, estanques y manantiales de mayor caudal, resaltando los Chorros del Varal, y los lagos Camécuaro, Cuitzeo, y Pátzcuaro.

El estudio se llevó a cabo mediante un recorrido de reconocimiento geológico en el cual se definieron estratigrafía, geología estructural y geohidrología, además de tomarse muestras de agua de cada manantial con el objetivo de clasificarlas de acuerdo a los diagramas de Wilcox y Stiff, determinando que pertenecen a la familia bicarbonatada sódica.

De esa manera, se identificó que los manantiales de Cherán ocurren en contactos litológicos enclavados en los bordes de estructuras volcánicas basálticas del Plioceno, ubicados en una serie de fosas y pilares que fungen como zonas de recarga y descarga hídrica local.

ABSTRACT

The present thesis has as a general objective the characterization of geological features present in the Cheran Region, with the purpose of identifying the particularities that originate a series of 16 fresh water and low — flow springs, and their relations with the local aquifers. The study area is located in the most important water recharge zone in the State of Michoacán, known as the Purepecha Plateau (Michoacan — Guanajuato Volcanic Field) which, despite the annual rainfall ranges between 1,000 and 1,200 mm, presents a phenomenon of scarcity.

This event is attributed to the high porosity and permeability of the soils, as well as high regional fracturing, causing the rainwater to infiltrate immediately after the rains and be transmitted to the surrounding tectonic trenches, originating a series of lakes, springs and spring pools of greater flow, highlighting the Chorros del Varal, and the lakes Camecuaro, Cuitzeo, and Patzcuaro.

The study was carried out through a geological survey route in which stratigraphy, structural geology and geohydrology were defined, in addition to taking water samples from each spring with the aim of classifying them according to the Wilcox and Stiff diagrams, determining that they belong to the sodium bicarbonate family.

Thus, it was identified that the springs of Cheran occur in lithological contacts nestled on the edges of basaltic volcanic structures of the Pliocene, located in a series of pits and pillars that serve as local recharge and discharge zones.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de una colaboración llevada a cabo con el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), localizado en Jiquilpan, Michoacán, cuyo objetivo primordial es comprender las características geológicas del sector NE de la Meseta Purépecha que originan un conjunto de manantiales y su conexión con acuíferos locales; de esta forma, se idearán maneras de abastecimiento de agua potable a dicho poblado debido a la escasez de agua que presenta, y se explicará porqué persiste la insuficiencia en la zona de recarga mientras que en el área de descarga esta abunda.

MESETA PURÉPECHA

También conocida como Meseta Tarasca, o Sierra Purépecha, es habitada en un 20% por indígenas purépechas, y corresponde a la zona de recarga hídrica más importante del Estado de Michoacán, con valores pluviales oscilantes entre 1,000 y 1,200 mm anuales, debido a que presenta las mayores elevaciones topográficas del Estado, destacando los volcanes Tancítaro y Campanario con 3,840 y 3,640 msnm, respectivamente (INEGI, 2017).

Pese a que el clima templado subhúmedo con lluvias en verano favorece la recarga hídrica, la insuficiencia de agua es característica de la región, y se adjudica a la gran porosidad de los suelos y fallamientos regionales, que provocan que el agua se infiltre inmediatamente tras las lluvias, impidiendo la creación de embalses y corrientes superficiales. De esta manera, las manifestaciones hidrológicas en la Meseta Purépecha se restringen a una serie de manantiales de agua dulce y bajo caudal, que históricamente han sido el suministro de agua para los habitantes.

Aludido a las características citadas, el almacenamiento de agua en el subsuelo ocurre de manera irregular y discontinua, y gran parte del agua captada en el área de recarga es dirigida a la zona de descarga suscitando una serie de manantiales de mayores caudales y dimensiones, destacando los Chorros del Varal, y otros que originan los ríos Cupatitzio y Duero, así como los estanques Camécuaro y Cupátziro; y los lagos Pátzcuaro y Cuitzeo (Manríquez — Espino, 2018).

Respecto a la demanda de agua, se aceleró a partir de la época colonial debido al incremento de la población, y durante el porfiriato la carencia aumentó aunado a la desecación del lago de Zacapu con fines de acrecentar la producción agrícola en las haciendas de la región.

El incremento de la demanda de agua originó una caída en los niveles de los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén, a lo que desde hace tres décadas se le atribuye la contaminación por aguas negras provenientes de los sistemas de alcantarillado de poblados circunvecinos (Argueta, 2008).

Por otra parte, la Meseta Purépecha ha sufrido las consecuencias del cambio de uso de suelo debido a la deforestación masiva para el cultivo de aguacate, incrementando la insuficiencia de agua (Velázquez — Guerrero, 2013).

Ante dicha problemática, relativo al estado del arte, regionalmente existen algunos trabajos antecedentes que favorecen referencias para la presente tesis, destacando el “estudio geohidrológico en los valles de Uruapan y Coahuayana, Michoacán” realizado por Ariel Construcciones S.A. en conjunto con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidraulicos, en 1980; “prospección geohidrológica de la Meseta Tarasca, Michoacán” (Almaraz, 1990), y “dinámica del agua subterránea en la Meseta Purépecha” (Manríquez — Espino, 2018). De esta forma, el desabasto se solucionó parcialmente con la perforación de pozos profundos, y con métodos de captación pluviométrica.

REGIÓN CHERÁN

Se sitúa en el municipio homónimo, asentada en el sector noreste de la Sierra Tarasca, en cuya toponimia local, *Cherán* significa “*lugar de tepalcates*”, y resalta por presentar una población total del 97% de indígenas purépechas (Carrasco — Orellana, 2015), que históricamente han luchado por sobrevivir conservando su sistema de creencias, tradiciones y gobierno.

El acceso al agua ha sido el principal problema al que se ha enfrentado la población: a partir de la época precolombina optaron por almacenarla en pequeños embalses

artificiales inmediatamente al brotar desde los manantiales, tanto para fines de consumo humano, como para la agricultura y ganadería (Argueta, 2008).

Por otra parte, la tala ilegal del bosque, aunada al cultivo desmedido de árbol de aguacate, conocido como “oro verde” (De la Tejera, 2013) ha destacado como el más reciente detonante de la carencia del líquido, devastando 9,070 hectáreas entre los años 2011 a 2016 (España — Boqueta 2016).

Sin embargo, actualmente los 16 manantiales no dan suficiente abasto a la población, y, debido a que la carencia se presenta principalmente en la temporada de estiaje, esta ha sido solucionada parcialmente con la construcción de once hoyas captadoras de agua pluvial de pequeñas dimensiones, una serie de tuberías que llevan el agua de los manantiales hacia las llaves comunales ubicadas en las esquinas de la población, y con la perforación un pozo profundo localizado a las 5 km de Cherán, cuyos costos de electricidad para la bomba resultan elevados, estimados en 150,000 pesos mensuales, además de que el agua tiene que ser bombeada para almacenarse en un estanque en las afueras de la comunidad, y su capacidad de abasto no es constante aludido a que suministra alternadamente a los cuatro barrios y ha registrado fuertes abatimientos.

Por consiguiente, a partir del año 2015 se inició la construcción de una estación captadora de agua pluvial con capacidad de 20,000 m³ localizada en la cima del Volcán Kukundicata: donde esta es purificada, llevada pendiente abajo, y distribuida a los habitantes: parte esta se envasa en garrafones para consumo humano, costeano los gastos del pozo profundo. Posteriormente en 2017 se rehabilitó la planta de aguas residuales localizada al Sur de la comunidad.

También, en el mismo año se edificó otra estación de tratamiento de aguas residuales al sur del poblado, y se construyó un segundo pozo profundo. Sin embargo, aunque en menores dimensiones, el déficit prevalece.

JUSTIFICACIÓN

La insuficiencia de agua característica de la región purépecha de Cherán (zona de recarga) pese a las fuertes precipitaciones pluviales, y el desarrollo de importantes

cuerpos acuosos en el área de descarga, propicia el desarrollo de la presente tesis; es necesario identificar las características geológicas (rasgos estructurales, unidades estratigráficas) que favorecen el desarrollo de manantiales en el área citada, estableciendo la conexión hidrológica del sistema de aguas superficiales y subterráneas. De esta manera, de acuerdo a los resultados de este estudio, se identificarán maneras de adquirir y suministrar suficiente agua a la región y se explicará el fenómeno de déficit/abundancia del líquido.

Por otra parte, en la investigación bibliográfica llevada a cabo con la finalidad de identificar el estado del arte, existen trabajos precedentes que abordan el ámbito geohidrológico local mediante los datos del subsuelo conseguidos en la perforación de pozos profundos y facilitan el análisis de información, sin embargo, no mencionan unidades estratigráficas que distingan a las unidades geohidrológicas, y abordan parcialmente el ámbito de los manantiales de la zona de recarga.

Acorde, la justificación del presente trabajo de tesis se establece en ambas problemáticas: el déficit/abundancia de agua en la región, y la ausencia de trabajos anteriores que hagan hincapié en distinguir las características del ambiente geológico (estratigrafía, geología estructural) de la zona de recarga que origina los manantiales de la Región Cherán y su correlación con la zona de descarga.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La carencia de agua en la Región Cherán y la Meseta Purépecha representa el problema principal, el cual se ha extendido debido al incremento demográfico y cambio de uso de suelo; aunque se han perforado pozos profundos de agua para suministro de dichas poblaciones, así como sistemas de captación de agua pluvial y plantas tratadoras de aguas residuales, la escasez prevalece.

En contraparte, en la zona de descarga existe una cantidad considerable de manifestaciones geohidrológicas (manantiales) en los que destacan los Chorros del Varal, y otros que originan las cuencas de los ríos Duero y Cupatitzio, del mismo modo que estanques y cuerpos lacustres como Camécuaro, Cupátziro, Pátzcuaro y Cuitzeo.

Ante esta situación, y a la ausencia de trabajos geológicos antecedentes que definan las características geológicas de la zona de recarga de Cherán resaltando los manantiales, es necesario un trabajo de investigación que defina los rasgos geológicos de la zona de recarga y los correlacione con el área de descarga, para comprender el tipo y conexión de los manantiales y acuíferos existentes que en un futuro propicien la identificación de otras posibles unidades acuíferas abastecedoras de la región.

OBJETIVOS

GENERAL

- Caracterizar los rasgos geológicos de la zona de recarga de los manantiales de la Región Purépecha de Cherán, con la finalidad de identificar las particularidades que originan a dichos manantiales, sus relaciones con los acuíferos locales, y déficit de agua, y correlacionarlas con el área de descarga para explicar el fenómeno de escasez/abundancia de agua.

ESPECÍFICOS

- Definir las unidades estratigráficas de la región.
- Establecer las características estructurales de la zona de recarga de los manantiales de Cherán, y correlacionarlas con las de la Meseta Purépecha y de la región Zamora — Chilchota.
- Determinar las particularidades hidrológicas y geohidrológicas, clasificación y relación de los manantiales y acuíferos, y su modelo conceptual.
- Proponer una alternativa para amortiguar la carencia de agua en el territorio comunal de Cherán.

HIPÓTESIS

La reciente formación de la Meseta Purépecha, constituida por derrames lávicos basálticos intercalados con tobas y cenizas andesítico — basáltico, así como a los fallamientos normales regionales, ocasionan que, a pesar de contar con fuertes recargas pluviales, el agua se infiltre inmediatamente al subsuelo a través de la porosidad del suelo y los accidentes estructurales, transmitiéndola hacia los bajos

estructurales que rodean a la meseta, causando de esta manera el fenómeno de escasez en el área citada, y el desarrollo de cuerpos acuosos en el área de descarga.

A su vez, los pocos espesores de las unidades acuíferas locales permiten el almacenamiento de agua en cantidades limitadas, originando una serie de acuíferos locales de menores dimensiones en las estructuras volcánicas, que son drenados mediante una serie de manantiales en la zona de Cherán hacia el área de descarga.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente tesis, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

En esta etapa se efectuó una búsqueda bibliográfica en publicaciones sobre acuíferos, manantiales, geohidrología, trabajos antecedentes del área de estudio, y otros relacionados al ámbito geohidrológico, recurriendo a tesis, libros, informes y artículos de revistas especializadas, con la finalidad de ordenar y sintetizar la información recalcada para determinar el estado del arte de la región, identificar los ámbitos que aún carecían de información o la abordaban parcialmente, y plantear la justificación, problemática, objetivos e hipótesis de la presente tesis.

Se enfatizó en las investigaciones llevadas a cabo por la Comisión Nacional del Agua e INEGI, pues al tratarse de un trabajo de reconocimiento de ambiente geológico en base a la recarga de manantiales y acuíferos, fueron necesarios datos duros de unidades acuíferas, referidos al desarrollo de pozos profundos productores que enmarcaran elevación y profundidad del nivel estático, y sus respectivas unidades litológicas. Además, se consultó la carta de provincias hidrogeológicas de México, y un informe de caracterización de acuíferos someros mediante exploración geológica y geofísica.

Por otra parte, en el anuario estadístico y geográfico del Instituto Nacional de Estadística e Informática, se consultaron los valores de precipitación media anual registrada en las estaciones vecinas, así como hidrografía, clima, suelo y vegetación.

Recalcando el ámbito geológico, se acudió a la carta geológica E14-1 (Morelia) del Servicio Geológico Mexicano, estableciendo especial énfasis en las unidades estratigráficas descritas, así como en el sistema geológico — estructural característico de la región, y a artículos científicos publicados en revistas del ámbito geológico como gaceta UNAM, boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, asociaciones petroleras, etcétera.

Al sintetizar y ordenar las referencias citadas, los capítulos de introducción, marco teórico y geológico fueron redactados, distinguiendo los datos obtenidos en investigaciones anteriores de los que aún no se conseguían, especialmente en geohidrología, estratigrafía y geología estructural.

TRABAJO DE CAMPO

Al culminar con el estado del arte y establecer los objetivos del trabajo, se realizó un recorrido exploratorio de geología superficial en la zona estudiada durante los días 5, 6 y 7 de Marzo del año 2020, con el propósito de reconocer las unidades estratigráficas aflorantes, edificios volcánicos, modelo estructural, manifestaciones geohidrológicas (manantiales), y establecer las relaciones entre ellos a manera de sintetizar las características geológicas que suscitan tales manifestaciones y sus relaciones con los acuíferos locales.

Se tomaron muestras de mano de las distintas unidades estratigráficas en los afloramientos más representativos con el uso de un martillo de geólogo Estwing tamaño standard, y se guardaron en bolsas ziploc tamaño mediano, anotando su descripción, número de muestra, coordenadas, altitud, fecha y hora; la medición de espesores de las unidades estratigráficas se llevó a cabo utilizando un Báculo de Jacob y flexómetro.

Las coordenadas geográficas, UTM, y altitud sobre el nivel del mar se obtuvieron con ayuda de un GPS Garmin, modelo GPS Map 64, y los datos estructurales mediante una brújula Brunton azimutal.

Respecto al muestreo de agua, se concretó en estudios realizados anteriormente por investigadores del CIIDIR con probetas estériles, tomando la muestra

directamente del flujo de agua del manantial, registrando su número, fecha, hora, coordenadas y altitud.

Por último, las fotografías fueron obtenidas con el uso de una cámara fotográfica semiprofesional Sony DSC-HX80, seleccionando los afloramientos, manantiales y estanques más peculiares con la intención de incluirlas en el trabajo a manera de evidencia.

TRABAJO DE LABORATORIO

Se consumó en los laboratorios de hidrología y petrología del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) emplazado en el poblado de Jiquilpan, Michoacán, realizando secciones delgadas de las muestras de mano obtenidas en el recorrido de campo, utilizando portaobjetos, cubreobjetos, polvo abrasivo, cortadora y resina cristal, con el motivo de caracterizarlas mediante un microscopio petrográfico Zeiss, y, de acuerdo a las observaciones hechas en campo, establecer su relación con su sistema hídrico característico.

Los resultados de los análisis de agua fueron obtenidos de las investigaciones previas llevados a cabo por los investigadores del instituto mediante las técnicas de análisis químicos, PH, y sólidos disueltos; y de otros trabajos antecedentes regionales.

PERCEPCIÓN REMOTA

De acuerdo a los datos recabados en campo mediante el uso del sistema de posicionamiento global GPS, como lo son: localización de los manantiales, elevación, corrientes superficiales, unidades litológicas, edificios volcánicos, fallas y fracturas, se recurrió al sistema de información geográfica Arcmap para su vaciado, georreferenciación y análisis; se acudió al continuo de elevaciones mexicano de la página web del INEGI para descargar los modelos digitales de elevación del territorio estudiado, y generar el plano topográfico, geológico, modelo de sombras (hillshade), pendientes (slope), e irregular de triangulación (TIN).

Los planos de localización de acuíferos fueron hechos utilizando el mapa base satelital del software y el SINA, descargado de la página web de CONAGUA.

De esta forma, y de acuerdo a las interpretaciones concretadas en campo, laboratorio y estado del arte, se identificaron los sistemas de lineamientos locales/regionales de las manifestaciones geohidrológicas, sistemas de unidades geomorfológicas, litología, estratigrafía, fallas y fracturas principales, horst, grabens, y elevación sobre el nivel del mar; así, se relacionaron con el sistema hidrológico de la zona estudiada, identificando zonas de recarga, descarga, y relaciones espacio — temporales que permitieron identificar el tipo de acuíferos de Cherán.

TRABAJO DE GABINETE

Una vez recabada la información obtenida en los apartados de trabajo de campo y percepción remota, esta fue dividida en los capítulos de estratigrafía, geología estructural, y geohidrología, donde el suscrito asigna informalmente el nombre de las formaciones Cherán, Cheranástico, y el Pino; define el comportamiento y modelo estructural de la Región Cherán, y establece el modelo geohidrológico de la zona estudiada en base al sistema de manantiales característico del territorio citado de acuerdo a la zona de recarga y descarga. Finalmente, se hace un breve análisis para satisfacer las necesidades de agua a nivel regional, de acuerdo a los resultados de este estudio.

Finalmente, las leyes, normas y reglamentos que rigen el recurso agua en la República Mexicana, se obtuvieron en la página web del Diario Oficial de la Federación.

GENERALIDADES

Concorde al anuario estadístico y geográfico del Estado de Michoacán del año 2017, publicado por INEGI, y el trabajo realizado por Manríquez — Espino, en 2018, se resumen los siguientes apartados:

Localización del área estudiada

Se sitúa en la Meseta Purépecha (porción centro — occidental del Edo. De Michoacán, Mex.), formando parte del sector occidental de la Provincia Fisiográfica

del Eje Neovolcánico Transversal (Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana), y corresponde a un rectángulo cuyas coordenadas geográficas extremas son: 19°30' — 20°10' de latitud Norte, y 101°40' — 102°25' al Oeste del Meridiano de Greenwich, comprendiendo un área total de 630 km² (90 x 70 km)

Partiendo de la Ciudad de México, la ruta de acceso más rápida es tomando la autopista 57 D México — San Juan del Río, desviándose en Jilotepec hacia Atlacomulco por la carretera federal número 13 (arco norte); posteriormente se toma la autopista 15 D hasta el poblado de Ecuandureo, desviándose hacia Zamora, posteriormente a Chilchota mediante la carretera federal número 15, donde a la altura de Carapan se toma la desviación a Cherán (carretera federal número 37).

Clima, precipitación y vegetación

De acuerdo a su altitud sobre el nivel del mar, comprendida entre los 2,100 y 3,300 msnm, prevalecen dos tipos de clima: el templado subhúmedo con lluvias en verano, localizado en los altos topográficos de Cherán, cuya precipitación media anual oscila entre los 1,000 y 1,200 mm, y una temperatura media de 10 a 12° C; y el semicálido subhúmedo, perteneciente a la región Zamora — Tangancícuaro — Chilchota, con precipitaciones de 800 a 1,000 mm anuales, temperatura media de 18 a 20° C, y elevación de 1,580 y 1,830 msnm.

Respecto a la vegetación, existen bosques de pinos y encinos; ocotes y oyameles. La agricultura de la región corresponde a temporal (maíz, frijol), así como frutos rojos, aguacate y alfalfa. Por otra parte, la ganadería se encuentra desarrollada en menor medida, resaltando los ganados vacuno, porcino y bovino.

Hidrología

Debido a que la Región Cherán representa la zona de recarga principal de la porción noroccidental del Estado de Michoacán, en ella confluyen las cuencas hidrológicas de los ríos: Duero, Paracho, Cupatitzio, Lago de Pátzcuaro, y Angulo, cuyo origen es atribuido a las descargas de los manantiales de la Meseta Tarasca, correspondiendo a las regiones hidrográficas Lerma — Santiago y Balsas.

En Cherán, destacan las redes de drenaje radial en los conos monogenéticos, y paralela en volcanes escudo y subcuencas desarrolladas por el tectonismo distensivo regional. Por otra parte, en la población mencionada, no existen embalses ni esorrentía superficial permanente, los flujos hídricos se restringen a un conjunto de manantiales de bajo caudal que drenan acuíferos locales y transmiten el agua directamente al subsuelo, tomando la forma de la red superficial, llegando a las subcuencas Zamora — Tangancícuaro — Chilchota, donde el curso de agua origina manantiales de mayor caudal ocasionando embalses naturales alrededor de ellos, y la red de drenaje adquiere un arreglo dendrítico.

Por otra parte, los acuíferos que convergen en la zona son: Zamora, Zacapu, Uruapan, y Lagunillas de Pátzcuaro, caracterizados por desarrollarse en materiales volcánicos fracturados, porosos y permeables que, en la Meseta Tarasca, debido a los pobres espesores de las capas superiores, almacenan cantidades moderadas de agua en acuíferos libres, situación por la que se han perforado pozos profundos en la Meseta Tarasca para extraer el agua de acuíferos confinados y semiconfinados con mayores espesores.

Geomorfología

Hasenaka y Carmichel, (1985 a, b), exponen que la Sierra Tarasca se compone por 1,040 volcanes: 901 conos monogenéticos, 22 maars, 43 domos, 13 volcanes escudo, y 61 flujos de lava individuales, constituyendo una unidad geomorfológica de II orden conocida como Eje Neovolcánico, (Subprovincia Neovolcánica Tarasca, o Meseta Purépecha).

Debido a la erosión diferencial y al representar las estructuras volcánicas más antiguas, las chimeneas de los volcanes en escudo se encuentran expuestas y presentan el desarrollo de cárcavas poco profundas, mientras que los volcanes más jóvenes presentan baja erosión y menor desarrollo de cárcavas, y en ocasiones sobreyacen concordantes a los volcanes en escudo.

De esta manera, las características citadas describen un estado juventud tardía y juventud temprana, respectivamente (Davis, 1899).

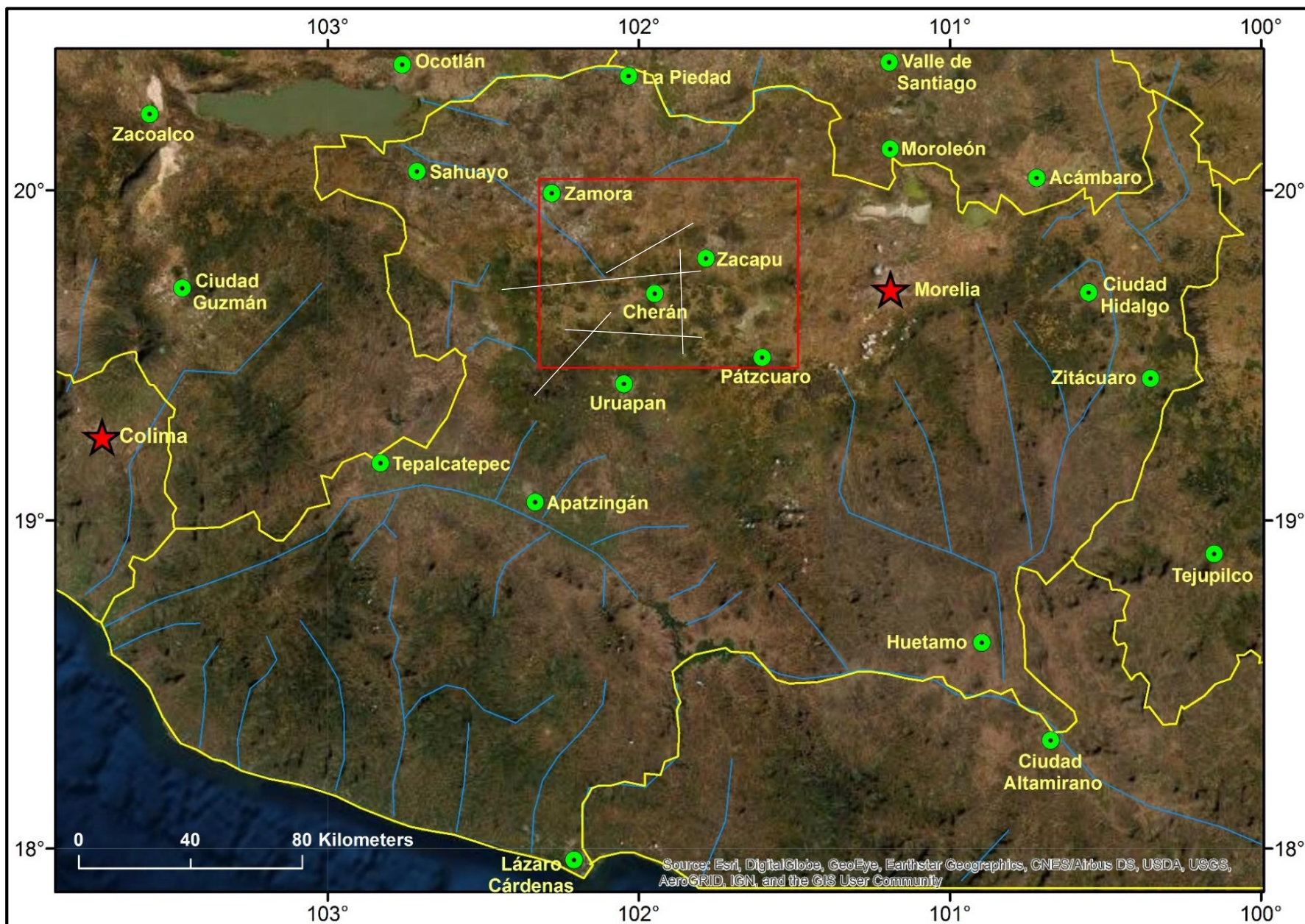


Figura 1.1, imagen satelital del Edo. de Michoacán mostrando el área estudiada en línea color rojo, situada en la porción occidental de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana; red hidrológica en línea color azul, tectonolineamientos en línea blanca, y límites jurisdiccionales en línea amarilla. Modificado de: Esri, 2020.

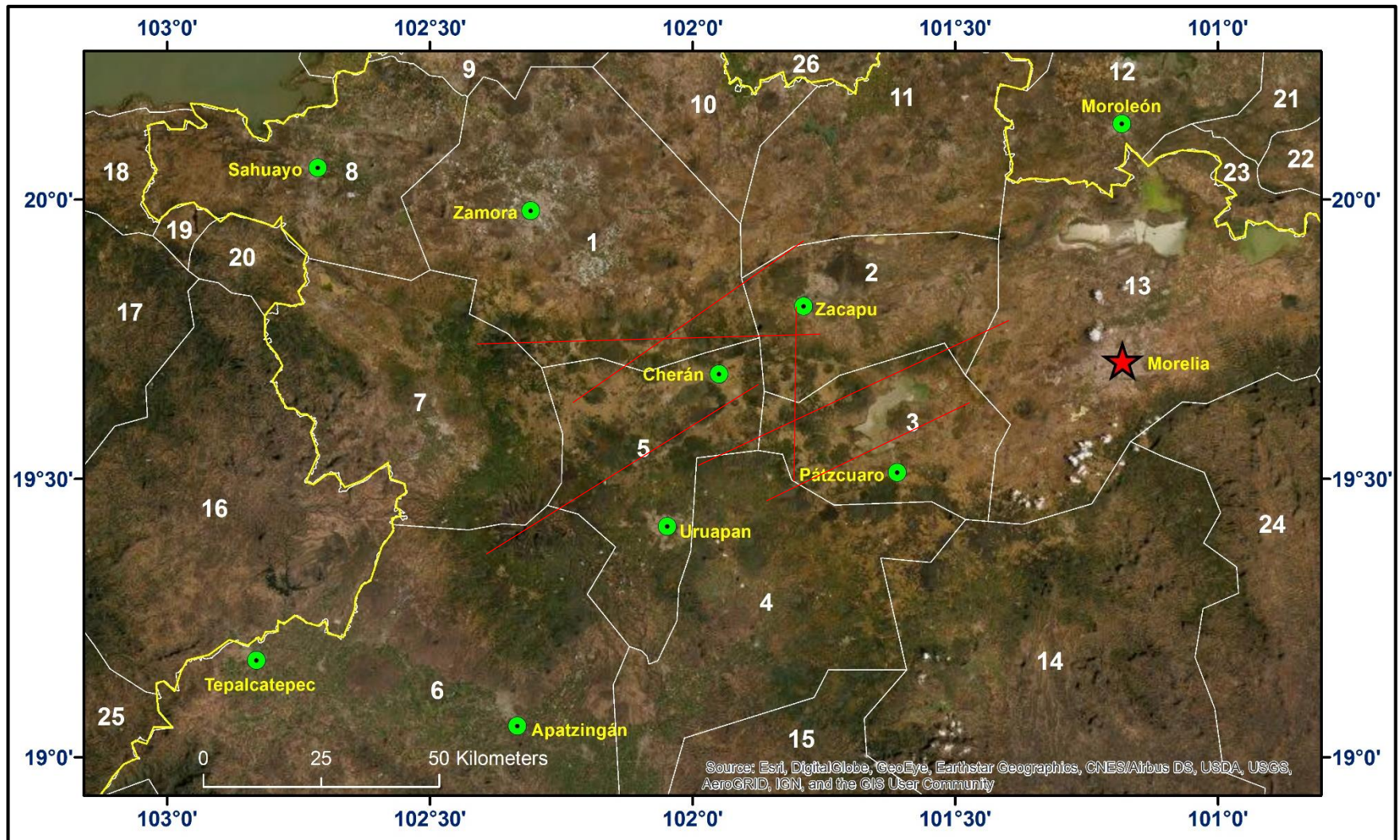


Figura 1.2, fotografía satelital de la porción noroccidental del Edo. de Michoacán, delimitado con línea amarilla, mostrando los tectonolneamientos en línea color rojo, y la distribución de los acuíferos cuya zona de recarga se localiza en la Región Cherán, y acuíferos adyacentes, en línea blanca: 1).- Zamora, 2).- Zacapu, 3).- Lagunillas de Pátzcuaro, 4).- Nueva Italia, 5).- Uruapan, 6).- Apatzingán, 7).- Cotija, 8).- Ciénega de Chapala, 9).- Briseña — Yurécuaro, 10).- La Piedad, 11).- Pastor Ortíz — La Piedad, 12).- Ciénega Prieta — Moreleón, 13).- Morelia — Queréndaro, 14).- Tacámbaro — Turicato, 15).- La Huacana, 16).- Colomos, 17).- Ciudad Guzmán, 18).- Tizapan, 19).- Valle de Juaárez, 20).- Quitupan, 21).- Salvatierra — Acámbaro, 22).- Valle de Acámbaro, 23).- Lago de Cuitzeo, 24).- Huetamo, 25).- Barreras, 26).- Penjamo — Abasolo. Modificado de: ESRI, 2020, CONAGUA, 2018.

1. MARCO TEÓRICO

Las siguientes definiciones se toman del glosario geohidrológico, elaborado por Ortiz — Aguirre, en 2015:

AGUA

Sustancia muy abundante en la Tierra, donde se presenta en estado gaseoso, sólido y líquido, y cuya molécula se encuentra constituida por 2 átomos de Hidrógeno, y 1 átomo de Oxígeno. En estado líquido ocupa el 71% de la superficie terrestre.

Su densidad a 4°C es 1 y, al contrario de lo que ocurre con las demás sustancias, cuando se solidifica disminuye su densidad.

HIDROLOGÍA

Ciencia que trata de las aguas terrestres, sus maneras de aparecer, distribución y circulación en la Tierra, así como sus propiedades físico — químicas, interacciones con el medio físico — biológico, y sus reacciones a la acción del hombre.

HIDROGEOLOGÍA

Se define como el estudio de las propiedades físico — químicas del agua, su almacenamiento, circulación y distribución en las zonas saturada y no saturada de las formaciones rocosas, sus interacciones con el medio físico — biológico, y reacciones a la acción antropogénica.

GEOHIDROLOGÍA

Rama de la Geología encargada de estudiar el origen, movimiento y acumulación de las aguas subterráneas.

Poros

Término referido a los espacios abiertos en una unidad rocosa (fracturas, diaclasas, planos de estratificación).

Porosidad

Índice escalar que relaciona el volumen de huecos con el volumen total de la roca.

Así, la porosidad es atribuida al espacio que puede ocupar el agua, es decir, indica la capacidad de almacenamiento del medio.

Permeabilidad

Capacidad de un medio para permitir el paso de un fluido a través de él.

Conductividad hidráulica

Propiedad de un medio poroso que permite el movimiento de un líquido a través del mismo bajo la acción combinada de los efectos de la gravedad, capilaridad y otros agentes impulsores.

Transmisividad

Producto del cociente de conductividad hidráulica por el espesor de la parte saturada del acuífero.

Pozo

Agujero o perforación realizado en un terreno cuyo diámetro sea mayor a 130 mm.

Nivel dinámico.

También conocido como nivel de bombeo, es el nivel al cual se mantiene el agua de un pozo cuando se extrae un cierto caudal por bombeo.

Nivel estático

Altura del nivel freático o superficie piezométrica cuando no está influenciada por el bombeo.

Nivel freático

Superficie que separa el suelo superior no saturado, del inferior saturado.

ACUÍFEROS

Se denomina acuífero a una formación rocosa que, por sus características de porosidad, permeabilidad y transmisividad, es capaz de almacenar agua en el subsuelo, y transmitirla a velocidades significativas; dicha agua es obtenida a través de la infiltración de aguas meteóricas, ríos, lagos u otros acuíferos, donde es transmitida mediante grietas, fracturas y poros de la roca, hasta alcanzar un nivel impermeable que no la permite descender más, acumulándose a través del tiempo

y circulando a favor de las pendientes, hasta alcanzar puntos favorables para salir a la superficie y originar manantiales, o descargar en otros cuerpos acuosos.

DE ACUERDO A SU AMBIENTE GEOLÓGICO

Libres: Son los más simples, consisten de una capa permeable que cede agua por desaturación, sometida a presión atmosférica, delimitada por una capa impermeable en la base, y otra permeable sin saturar en la cima. En ocasiones son denominados acuíferos colgados debido a que su descarga por medio de manantiales ocurre a altura considerable sobre el nivel base del cuerpo en que se realice.

Confinados: También denominados cautivos, se conforman por una capa saturada limitada en la base y la cima por capas impermeables, y su presión de sometimiento es mayor a la atmosférica, por lo que cuando se perfora un pozo en ellos, se genera artesianismo debido a la despresurización del sistema. El agua que transmiten procede de la expansión de la misma, así como la descompresión de la estructura permeable vertical cuando se produce una depresión en el acuífero.

Semiconfinados: Sus características son similares a los acuíferos libres y confinados, pues en ellos una de las capas limitantes de la zona saturada no es totalmente impermeable, y permite una cierta transmisión de agua verticalmente.

DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS

Acuitardos: Son acuíferos que transmiten el agua lentamente.

Acuicludos: Aquellos que tienen la capacidad de almacenar agua, pero sin transmitirla.

Acuífugos: Aquellas formaciones rocosas que no contienen ni transmiten agua.

DE ACUERDO A SU TEXTURA

Porosos: Aquellos generados por la alta porosidad de la formación rocosa.

Kársticos: Son los acuíferos característicos formados en carbonatos; el agua disuelve dichos materiales y avanza por medio de las cavidades realizadas.

Fisurados: Son los que se encuentran afectados por una intensa fracturación.

MANANTIALES

Se asigna con el término manantial a aquella zona de la superficie terrestre en el que de manera natural brota una corriente de agua del suelo o paredes rocosas, fluyendo o acumulándose originando escorrentía, estanques o lagos que ocasionalmente se conocen como ciénegas u ojos. Se localizan generalmente en la zona de recarga de las cuencas hidrológicas que, al filtrar el agua pluvial al subsuelo, originan acuíferos que la drenan por medio de los poros de la roca, así como fallas, fracturas, y otras discontinuidades como planos de estratificación, ductos y cavernas volcánicas, siendo expulsada en los bordes de los altos topográfico — estructurales, o en el suelo en altitudes menores.

La cantidad de agua expulsada por un manantial depende de diversos factores, destacando la cantidad de precipitación pluvial, área de recarga, permeabilidad del terreno, conductividad hidráulica y movimiento de las líneas de flujo. Por otra parte, los manantiales son designados como zonas de surgencia, donde el agua es expulsada a la superficie por medio de un agujero llamado orificio, y generalmente, las surgencias y zonas de infiltración coexisten de manera alternada, formando un lineamiento denominado como línea de manantiales que corre a través del paso de un accidente estructural.

Existen diversas clasificaciones de manantiales de acuerdo al caudal de agua, geología, dimensiones, características físico — químicas, sustancias minerales disueltas, tipo de surgencia, y profundidad de las aguas.

BRYAN (1919)

Propone la clasificación más completa, distinguiendo 2 grandes grupos: gravitacionales y no gravitacionales.

Gravitacionales

Se originan cuando el agua subterránea escurre desde el nivel freático del acuífero a través de materiales permeables hacia la superficie de la tierra, o donde esta intercepta el nivel freático. Los manantiales gravitacionales se subdividen en 3 categorías:

a) De depresión

Ocurre cuando la superficie de la tierra intercepta el nivel freático del acuífero en materiales permeables.

b) De contacto

Se forman cuando el agua subterránea fluye hacia la superficie a través del contacto de una capa permeable con otra impermeable.

c) De fractura (tubulares)

Cuando el agua surge por medio de una junta o fractura en las rocas desde canales de disolución en calizas o yeso, o a través de túneles naturales en flujos de lava.

d) En rocas impermeables

En canales tubulares o fracturas de una roca impermeable.

No gravitacionales

Referido a los manantiales que presentan artesianismo aludido a la presión a la que se encuentra sometido el acuífero confinado que los origina. El agua fluye a través de un accidente estructural desde la zona de mayor presión (acuífero) a la de menor presión (superficie).

Sin embargo, Bryan (op. Cita), también los divide en 10 grandes grupos:

De acuerdo a las sustancias disueltas

Llamados manantiales minerales, corresponden a aquellos cuyas concentraciones de minerales disueltos en el agua son mayores a las comunes, pues en su camino hacia la superficie el agua adhiere a su estructura atómica las sustancias solubles de la roca, enriqueciéndola en ciertos minerales hasta su descarga en la zona de surgencia. Los manantiales minerales son a los más abundantes, y de acuerdo a su

contenido mineralógico, se clasifican en: sulfatados (azufre), salados (sal), ferruginosos (fierro), carbonatados (calcio), etcétera.

Cabe destacar que en ocasiones dichos manantiales presentan propiedades terapéuticas, y de acuerdo a las creencias populares se catalogan como medicinales.

De acuerdo a la temperatura del agua

a) No termales

Un manantial es considerado como no termal cuando la temperatura del agua no supera la media de la temperatura anual del aire registrada en la región.

b) Termales

Se consideran como manantiales termales si el agua excede la temperatura media anual del aire en 5° C o más.

c) Fríos

Se denominan como manantiales fríos si la temperatura del agua es menor a la media anual del aire, y esta agua procede del derretimiento de glaciares y nieve, cuya temperatura se conserva desde la infiltración hasta la surgencia.

De acuerdo a la surgencia del agua

a) Hirvientes

Referido a aquellos manantiales con fondo arenoso en los que el agua emerge con gran fuerza agitando la arena, dando la apariencia de hervir.

b) Burbujeantes

Se refiere a los manantiales en los que el agua contiene cantidades considerables de gases disueltos como dióxido de carbono, nitrógeno o sulfuro de hidrógeno, que al ser expulsados con el agua en la zona de surgencia, crean burbujas que ascienden y son visibles en la superficie. Los manantiales carbonatados son sus principales exponentes.

De acuerdo a su temporalidad

a) Perennes

También conocidos como permanentes, son aquellos que transmiten agua todo el año, independientemente de la estación.

b) Intermitentes

También denominados temporales, son los que transmiten agua únicamente durante o después de las lluvias; algunos de ellos fluyen solamente durante la noche debido a la menor evaporación, así como a los ajustes de suministro.

c) Periódicos

Referidos a los manantiales cuya corriente fluye con mucha fuerza por largos o cortos períodos de tiempo, no encontrándose relacionados con las fluctuaciones pluviales, sino con cavidades abiertas que permitan el flujo de salida cuando estas se llenan; cuando la cavidad se llena, el agua es expulsada mediante un flujo, originando un manantial periódico. Sin embargo, la periodicidad extrema es ocasionada cuando la zona de surgencia actúa como un sifón, expulsando rápidamente el agua almacenada en la cavidad.

Geysers

Son considerados como manantiales termales que expulsan un flujo vertical de vapor y agua caliente en intervalos regulares o irregulares de tiempo mediante una surgencia localizada en el fondo de un estanque; la expulsión ocurre cuando el agua de la zona de surgencia excede el punto de ebullición, se evapora, expande y despresuriza, elevando el flujo creado hacia la superficie y ocasionando una erupción. Parte del agua expulsada es perdida, y se acumula nuevamente en la zona de surgencia, creando una nueva erupción cuando se acumule suficiente y se eleve a la temperatura adecuada.

Los geysers se relacionan a ambientes volcánicos ácidos activos, o de actividad reciente, debido a las grandes cantidades de silicio que contienen, cuyas cámaras magmáticas ceden calor al acuífero sobreyacente.

De acuerdo a las mareas

Las mareas oceánicas influyen directamente en los manantiales aledaños a la línea de costa: cuando esta aumenta, funciona como una represa para el agua subterránea, ocasionando que ésta fluya a mayor altitud en forma de manantiales; por otra parte, durante la marea baja, el volumen de agua subterránea disminuye, ocasionando que dichos manantiales disminuyan su caudal o se sequen.

a) Fluyentes

Este término se refiere a los manantiales que se localizan un poco alejados de la costa, cuyo caudal se incrementa durante la marea alta y disminuye cuando esta decrece.

b) Menguantes

Son manantiales que, debido a su mayor cercanía a la línea de costa, únicamente persisten durante la marea baja.

De acuerdo a las emisiones de aire

a) Soplantes (suspirantes)

“Bowling”, o “breathing springs”, por su traducción del inglés, son manantiales caracterizados por la emisión de aire en la zona de surgencia, acompañado por un sonido similar al de una trompeta, el cual tiene dos orígenes: 1). – Levantamiento del nivel freático, causando la expulsión del aire contenido en los poros y fracturas de la roca; 2). – Disminución de la presión barométrica, causando el mismo efecto.

Estos manantiales pueden mantener su sonido característico por períodos cortos o prolongados irregulares de tiempo, de acuerdo al levantamiento del nivel freático.

De acuerdo a su ocurrencia en climas áridos

a) Montículos y lomas

Como su nombre lo indica, corresponden a altos topográficos constituidos por arena y otros materiales sedimentarios acumulados por la acción del viento en regiones áridas, donde el agua emerge en su cima o cerca de ella, ocasionando que la vegetación crezca alrededor.

La altura del montículo depende de la altura que el agua emergente pueda alcanzar, y de la cantidad de vegetación existente que evite la erosión. Sin embargo, si el agua encuentra una nueva salida más abajo, el montículo es drenado y erosionado.

Estanques

Son acumulaciones naturales de agua proveniente de una o varias surgencias localizadas en depresiones del terreno; en ocasiones asemejan a un montículo, pues se encuentran rodeados de una capa de vegetación. Ocasionalmente contienen cantidades considerables de calcio y silicio.

Volcanes de lodo

Conocidos como “salses”, volcanes de aire, y “macculutos”, son montículos de forma cónica con una depresión en la cima constituidos de arcilla y/o arena fina originalmente disueltos en el agua que, al emerger fueron depositados al perder su velocidad; ocurren en manantiales temporales a lo largo de zonas de fracturas debido a terremotos.

MEINZER (1917)

Los define acorde a sus relaciones respecto con el acuífero:

Drenantes

También conocidos como de afloramiento, o de desagüe, son aquellos manantiales que drenan a partir de un acuífero colgado.

Emergentes

Aquellos que drenan un acuífero cuyo máximo espesor saturado se sitúa debajo de la cota de emergencia.

Filonianos

Son característicos de regiones ígneas o metamórficas, y son alimentados por aguas profundas que ascienden por medio de los accidentes estructurales.

MEINZER (1923)

De acuerdo a su caudal de descarga Q, estableciendo nueve grupos:

Primera magnitud: $\geq 2,800$ l/s.

Segunda magnitud: 280 — 2,800 l/s.

Tercera magnitud: 28 — 280 l/s.

Cuarta magnitud: 6.3 — 28 l/s.

Quinta magnitud: 0.63 — 6.3 l/s.

Sexta magnitud: 63 — 630 ml/s.

Séptima magnitud: 8 — 63 ml/s.

Octava magnitud: ≤ 8 ml/s.

Magnitud cero: Sin flujo, sitios con flujos existentes en el pasado.

MARCO GEOLÓGICO

GEOLOGÍA REGIONAL

LÍMITE CONVECTIVO PACÍFICO — NORTEAMÉRICA

Las evidencias más antiguas del desarrollo de arcos magmáticos asociados a límites convectivos en el actual territorio de la República Mexicana se remontan a los períodos Pérmico — Triásico, en la porción comprendida desde Nevada — California, E.U., hasta Chiapas, Mex., donde se desarrolló un arco magmático NW — SE ocasionado por la subducción de la Placa Farallón posterior al cierre del Proto Océano Atlántico, cuya actividad ígnea culminó en el Jurásico Medio con la apertura del Golfo de México (Damon, 1981).

Sin embargo, durante el Cretácico Inferior dicha secuencia fue afectada por una etapa de rifting, que, de acuerdo a los trabajos de Martini, en 2011 y 2014; Centeno — García, (2003, 2008); así como Talavera — Mendoza, en 2007, origina un arco magmático que bordea la costa oeste norteamericana, que se extingue durante el Cretácico Medio.

Por otra parte, dicho arco sufrió una reactivación durante la Orogenia Laramide, caracterizado por la expulsión de derrames lávicos y materiales volcanosedimentarios andesíticos asociados al desarrollo de pórfidos de Cu, Mo, W, y monzoníticos, a lo largo del territorio de las actuales Sierra Madre Occidental y del Sur, comenzando su migración hacia el interior del continente.

Por último, la rotación de la Placa Norteamericana en sentido antihorario, y la apertura del Golfo de California originan un vulcanismo ácido en la Sierra Madre del Sur, asociado a la subducción de la Placa Rivera (Gómez — Tuena, 2007), y de Cocos, que origina el Eje Neovolcánico durante el Oligoceno — Mioceno.

ARCO MAGMÁTICO DE LA SIERRA MADRE DEL SUR

La Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur ha sido catalogada por Raisz, en 1964, como una cadena montañosa que atraviesa la porción SW — SE de la República Mexicana paralela a la línea de la costa del Océano Pacífico con orientación NW — SE, cuyas dimensiones son: 1,200 km de longitud y 200 km de

anchura, desde las proximidades de Bahía de Banderas, Edo. De Jalisco, hasta las inmediaciones de la fosa tectónica del Istmo de Tehuantepec, Edo. De Oaxaca; su altitud promedio oscila en 2,000 msnm, siendo el punto más alto el Cerro Quie Yelaag (3710 msnm), en el Edo. De Oaxaca (INEGI, 2017).

Geomorfológicamente, se incluye en el orden II de acuerdo a la clasificación hecha por Raisz, en 1964, y se divide 10 subprovincias: 1).- Sierras de la Costa de Jalisco y Colima, 2).- Cordillera Costera del Sur, 3).- Depresión del Balsas, 4).- Depresión del Tepalcatepec, 5).- Sierras y Valles Guerrerenses, 6).- Sierras Orientales, 7).- Sierras Centrales de Oaxaca, 8).- Mixteca Alta, 9).- Costas del Sur, y 10).- Sierras y Valles de Oaxaca.

Geológicamente dicha cadena montañosa es considerada por Morán — Zenteno, en 1999, como La Provincia Magmática de la Sierra Madre del Sur, constituida por dos cinturones NW — SE: uno ubicado inmediatamente al Sur de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, constituido por una serie de centros volcánicos conformados por tobas, derrames, diques y en algunas ocasiones cuerpos plutónicos de composición silícica — andesítica, cuya edad pertenece al Oligoceno — Mioceno.

El segundo cinturón bordea la costa del Océano Pacífico, es caracterizado por ser de naturaleza plutónica y composición félsica, cuya edad oscila en Cretácico Superior — Paleoceno. Ambas estructuras quedan limitadas por una fosa tectónica entre ellas (Despresión del Balsas), y sobreyacen en discordancia a las estructuras laramídicas constituidas por rocas carbonatadas — terrígenas de las plataformas carbonatadas Huetamo, Guerrero — Morelos, y Córdoba (Fries, 1960).

Ortega — Gutiérrez, en 1992 la divide en 9 provincias geológicas: 1).- Batolito de Jalisco, 2).- Complejo Orogénico Guerreo — Colima, 3).- Plataforma Guerrero — Morelos, 4).- Mixteca, 5).- Chatina, 6).- Juchateca, 7).- Zapoteca, 8).- Cuicateca, y 9).- Cuenca de Tehuantepec.

Su espesor cortical es variable; Ortega — Gutiérrez, en 2008, por medio del estudio de xenolitos reportados por Elías — Herrera, en 1997, y Ortega — Gutiérrez, en

2011 y 2012, así como la interpretación de estudios de gravimetría realizados por Molina — Garza *et al*, 1993; Urrutia — Fucugauchi *et al*, 1996; García — Pérez *et al*, 1997; y Campos — Enríquez *et al*, en 2000, concluye que alcanza un espesor de 32 km en su sector occidental (Terreno Guerrero), y presenta un engrosamiento hacia el sector oriente (Plataforma Guerrero — Morelos, con espesores de 40 a 45 km).

Su origen ha suscitado diversas controversias: Damon, en 1981, propone que corresponde a la prolongación meridional de la porción SE de la Provincia Geológica de la Faja Ignimbrítica Mexicana (Sierra Madre Occidental) debido a las similitudes de orientación, composición y edad, siendo la transición hacia la secuencia de la Sierra Madre del Sur; Campa y Coney, en 1983 lo atribuyen a la acreción continental ocasionado por el choque de varias placas litosféricas; mientras que Morán — Zenteno (1998) indica que fue originada debido al sistema subductivo Pacífico — Norteamérica.

Basamento

La Provincia Magmática de la Sierra Madre del Sur sobreyace a basamentos de distintas características, razón por la que Campa y Coney, en 1983, la dividieron en los terrenos tectonoestratigráficos: Guerrero, Mixteco, Oaxaca, y Xolalpa, correspondientes a las provincias geológicas: Cinturón Orogénico Guerrero — Colima, Plataforma Guerrero — Morelos, Mixteca, Zapoteca, Cuicateca y Chatina.

Terreno Guerrero

Propuesto por Campa y Coney, en 1983, se localiza en la porción occidental de la República Mexicana, bordeando las costas del Océano Pacífico y centro del país, cubriendo un área de 700, 000 km²; es uno de los terrenos tectono — estratigráficos más grandes de Norteamérica, constituido por volcanosedimentarios de arco volcánico submarino del Jurásico Superior — Cretácico Medio, cuyo basamento corresponde al Complejo Arteaga, (Ortega — Gutiérrez, 1991) compuesto por carbonatos marinos y terrígenos de aguas profundas intercalados con lavas almohadilladas, esquistos verdes, tobas, y dioritas de la Formación Varales, de edad Triásico Medio — Superior (Ladiniano — Cárnico), con metamorfismo desarrollado

en el Jurásico Inferior — Medio (Sinemuriano — Bajoniano) debido al desarrollo del arco volcánico mencionado.

De acuerdo a las facies de aguas profundas triásicas, alto metamorfismo, desarrollo de cuerpos intrusivos y plegamiento del Jurásico Inferior, el Terreno Guerrero ha sido considerado por Centeno — García *et al*, en 1993, como un prisma de acreción del límite convergente Pacífico — Norteamérica, caracterizado por el desarrollo de un arco volcánico Jurásico — Cretácico que originó la secuencia volcanoclástica mencionada.

Estructuralmente una serie de fallas inversas N — S y NW — SE con caída al E define a este subterreno, originadas durante el Cretácico Superior.

Respecto a sus límites, algunos autores difieren debido al desarrollo de la Plataforma Guerrero — Morelos: Campa y Coney, en 1983; y Talavera *et al*, en 2007 lo definen en la Falla Teloloapan — Pachivia; mientras que Sedlock *et al*, 1993 lo establece en la Falla Papalutla.

De acuerdo a sus características litológicas, el Terreno Guerrero ha sido dividido en los subterrenos Teloloapan y Arcelia, de características distintivas.

Orogenia Laramide

Corresponde a una fase tectónica de acortamiento cortical acaecida durante dos eventos en el sector SW de la República Mexicana, asociado al comienzo del límite convergente de las placas Farallón — Norteamérica; el intervalo de inicio y final del primer evento es variable regionalmente, formando pliegues alargados orientados NW — SE recostados hacia el NE, ocurriendo durante el Cenomaniano — Paleoceno en las inmediaciones del Arco Volcánico de Teloloapan, Cenomaniano — Santoniano en la Plataforma de Huetamo, y Santoniano — Campaniano en el límite Este y Oeste de la Plataforma Guerrero — Morelos (Salinas — Prieto, 2000; Talavera — Mendoza, 2000).

Cerca (2007), y Martini (2008), establecen el segundo evento de acortamiento en el Paleoceno debido a la acción de fallamientos de componente lateral izquierdo debidos a compresión asociada a la rotación del Bloque Acatlán — Oaxaca en las

estructuras laramídicas creadas en la fase anterior, y sedimentos continentales del Paleoceno, ocasionando un cambio en su vergencia hacia el SW.

Alaniz — Álvarez, en 2002, documenta que durante el Eoceno — Oligoceno ocurre un evento extensional NW — SE que origina fallamientos de carácter lateral izquierdo, mientras que en el Oligoceno ocurre otro de orientación E — W y NE — SW.

Facies Continentales Terciarias

Esta fase inicia a finales de la Orogenia Laramide y comienzos del Eoceno, con el depósito de los productos erosivos de anticlinales en los sinclinales, y que ocasionalmente desarrollaron cuencas lacustres, formando abanicos aluviales constituidos por conglomerados de rocas carbonatadas de plataforma, talud y cuenca, cementadas por una matriz arenosa — limolítica color rojizo debido a la actividad volcánica, a la cual Fries, en 1960, denomina como Formación Balsas.

ARCO MAGMÁTICO DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA

Raisz (1964) designa con el nombre de Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal a una cadena montañosa que atraviesa la porción sur — central de la República Mexicana entre los paralelos 19° y 20° de latitud Norte, con una orientación WNW — ESE, cuyas dimensiones abarcan 1,000 km de longitud y 230 km de anchura, comprendiendo desde las proximidades de Tepic, Nayarit, hasta las inmediaciones de Palma Sola, Edo. De Veracruz. Dicha cadena montañosa ha sido catalogada por Demant, en 1978, como la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, cuya altitud promedio oscila en 2200 msnm, siendo el punto más alto el volcán Pico de Orizaba (5,747 msnm), en el Edo. De Veracruz.

Desde el punto de vista geomorfológico, el Eje Neovolcánico se incluye en el orden II de acuerdo a la clasificación elaborada por Raisz, en 1964, y se divide en 15 subprovincias: 1).- Sierras Volcánicas Nayaritas, 2).- Altos de Jalisco, 3).- Sierras de Jalisco, 4).- Guadalajara, 5).- Bajío Guanajuatense, 6).- Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, 7).- Chapala, 8).- Sierras y Bajíos Michoacanos, 9).- Mil Cumbres, 10).- Chiconquiaco, 11).- Lagos y Volcanes del Anáhuac, 12).-

Neovolcánica Tarasca, 13).- Volcanes de Colima, 14).- Escarpa Limítrofe del Sur, y 15).- Sierras del Sur de Puebla.

Respecto al ámbito geológico, dicha cadena montañosa se encuentra constituida por un conjunto de más de 8,000 edificios volcánicos conformados por tobas, derrames lávicos, ignimbritas y algunos cuerpos intrusivos que alcanzan un espesor comprendido entre 1,500 y 2,000 msnm, destacando una serie de estratovolcanes orientados NW — SE que bordean fosas tectónicas que en ocasiones han suscitado el desarrollo de cuencas lacustres plio — cuaternarias; y conos cineríticos NE — SW, representando las estructuras más abundantes en el territorio citado.

Dadas las características citadas, Gómez — Tuena *et al*, en 2007, considera a dicha provincia geológica como el Arco Magmático de la Faja Volcánica Transmexicana, y por medio de fechamientos isotópicos K^{39} — Ar^{40} en más de 700 muestras recolectadas a lo largo de dicha provincia, le asigna una edad Mioceno — Holoceno y atribuye su origen al límite subductivo Cocos — Norteamérica.

Sin embargo, debido a las características estructurales presentes regionalmente, y para efectos prácticos, se ha dividido a la Faja Volcánica Transmexicana en 3 sectores bien definidos: occidental, limitado por las costas del Océano Pacífico y los rifts de Chapala, Zacoalco, y Colima; central, comprendida entre esta última y el Sistema de Fallas Taxco — San Miguel de Allende; y oriental, cuyos límites comprenden dicho sistema de fallas y las costas del Golfo de México (Alaníz — Álvarez, 2002).

Debido a que la orientación de dicha provincia geológica difiere a la del límite subductivo Cocos — Norteamérica, su origen ha suscitado diversas controversias: Mooser, en 1958, sugiere que constituye la prolongación oriental de la falla transformante de Clarión, localizada en el Océano Pacífico Oriental; sin embargo, en 1959, propone que se originó debido al magmatismo generado en una geosutura como consecuencia del calentamiento diferencial de la corteza al unirse dos bloques cratónicos.

Además, Damon, en 1981, atribuye su desarrollo a la prolongación meridional de la porción SE de la Provincia Geológica de la Faja Ignimbrítica Mexicana (Sierra Madre Occidental) debido a las similitudes de orientación, composición y edad, ya que de acuerdo al autor citado, la franja ignimbrítica de carácter silíceo y edad Oligoceno — Mioceno característica de la Sierra Madre Occidental, daría paso a la firma andesítica — riolítica del Eje Neovolcánico.

Campa y Coney, en 1983 lo refieren a la acreción continental ocasionado por el choque de varias placas litosféricas; mientras que Morán — Zenteno (1998) indica que fue originada debido al sistema subductivo Pacífico — Norteamérica; la última de estas teorías fue atribuida por Sheth y Verma, en el año 2002, estipulando el origen de dicha provincia a las primeras etapas de un rompimiento continental, evidenciado por los rifts de Chapala, Zacoalco y Colima, localizados en el sector occidental.

Basamento

El Arco Magmático de la Faja Volcánica Transmexicana sobreyace en discordancia a estructuras de deformación cortical desarrolladas durante el Cretácico Superior — Eoceno (Orogenia Laramide) constituidas por carbonatos marinos de plataforma/aguas profundas, y secuencias de abanicos submarinos de sedimentación tipo flysh depositados en la cuenca mesozoica de la Sierra Madre.

El sector occidental sobreyace al Terreno Guerrero, mientras que el central y una porción del oriental cubren al Terreno Mixteco, y el resto yace al Terreno Oaxaquia; en estudios realizados por Henry (1977, 1979) en la Provincia Geológica de la Faja Ignimbrítica Mexicana (Sierra Madre Occidental), se estima que el espesor de la secuencia sedimentaria marina de la Cuenca de la Sierra Madre comprende 2,000 m de espesor, mientras que actualmente el Eje Neovolcánico cuenta con un estimado de 1500 — 2000 m de espesor (Mooser, 1994).

Respecto a su espesor cortical, estudios gravimétricos realizados por: Molina — Garza y Urrutia — Fucugauchi (1993), De la Fuente (1994), Urrutia — Fucugauchi y Flores — Ruiz (1996), Flores — Ruiz (1997), García — Pérez y Urrutia —

Fucugauchi (1997), Campos y Sánchez (2000); así como estudios sísmicos desarrollados por Urrutia — Fucugauchi (1986), Valdés (1986), Nava (1988), Campillo (1996), refieren que oscila entre 15 a 25 km en las costas del Océano Pacífico y Golfo de México, aumentando gradualmente hacia el interior del continente alcanzando hasta 47 km en su porción central.

El punto triple del sector occidental del Eje Neovolcánico

Debido a los distintos lineamientos característicos de la región, definidos por los sistemas de fallas: Mazatán — Pochotitlán, Chapala, y Colima; a la actividad volcánica reciente, y la evolución tectónica del margen occidental de la República Mexicana, diversos autores como Demant (1979), sugieren la presencia de tres rifts asociados a dichos sistemas de fallas, ocasionados por una extensión hacia el oriente de la falla Clarión, correspondiente al límite de las placas de Cocos y Rivera, la cual generó una serie de fallamientos principales E — W en el interior continental, y otros NW — SE y N — S asociados al mismo. De acuerdo a los autores citados, dicho proceso de rompimiento continental es corroborado por la cuenca lacustre de Chapala, y la existencia de grabens que cuentan con las orientaciones citadas.

Rift de Tepic — Zacoalco

Demant, en 1979, denomina como graben de Tepic — Chapala a una serie de fallamientos de carácter lateral derecho NW — SE que originan fosas tectónicas y cuencas pull apart entre el límite noroccidental del Lago de Chapala, Edo. De Jalisco, y Tepic, Edo. De Nayarit, originado los sistemas de fallas Mazatlán y Pochotitlán (Mioceno — Holoceno), mientras que Allan, en 1991, mediante un estudio más detallado de dichas fallas, se refiere a éste como el rift de Tepic — Zacoalco.

Se acuerdo a Allan (op. Cita), el rift mencionado se originó durante el Plioceno como consecuencia de la apertura del Golfo de California y un salto hacia el Este de la Falla Rivera, de carácter lateral derecho.

Rift de Colima

Nixon, en 1982, nombra como graben de Colima a una serie de fallamientos normales y fosas tectónicas del Mioceno — Holoceno y orientación N — S, cuyo

origen atribuye a un desgarre de la corteza terrestre ocasionado por la baja velocidad de subducción de la Placa de Cocos; por otra parte, Lurh, *et al*, en 1985, atribuyen dicho origen a un salto de la dorsal del Pacífico.

Rift de Chapala

Definido por Demant, en 1979, se compone por una serie de fallamientos normales E — W localizados al S — SE de la Ciudad de Guadalajara, Jal., cuya actividad volcánica comienza a finales del Mioceno y a partir del Plioceno alberga una cuenca lacustre endorreica conocida como Lago de Chapala.

Sin embargo, Garduño, en 1991, mediante un estudio geológico — estructural, menciona que actualmente dicho rift se encuentra inactivo, catalogándolo como un aulacógeno.

2). - GEOLOGÍA LOCAL

SUBPROVINCIA SIERRAS Y BAJÍOS MICHOACANOS

El área estudiada se localiza en la Subprovincia Sierras y Bajíos Michoacanos, situada en la porción occidental de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, enmarcada en los límites jurisdiccionales del Edo. De Michoacán, al Oeste de la capital del Estado, y al SE de la Ciudad de Zamara de Hidalgo.

En el área citada aflora una secuencia ígnea — eruptiva conformada por materiales volcanosedimentarios de grano grueso (tobas), cuya edad corresponde al período Mioceno — Pleistoceno y producto de la actividad volcánica estromboliana acaecida debido al magmatismo andesítico — basáltico generado en el límite subductivo Cocos — Norteamérica, evidenciado por los numerosos conos cineríticos expuestos en la región.

Dicha secuencia yace concordante a tobas y derrames andesítico — basálticos del Oligoceno — Mioceno que a su vez sobreyacen en discordancia a las estructuras laramídicas desarrolladas durante el Cretácico Superior — Eoceno.

El basamento queda representado por una secuencia metasedimentaria aflorante en el Anticlinal de Tzitzio, constituida por carbonatos de aguas profundas y sedimentos flysh en facies de abanicos submarinos, que en ocasiones se intercalan

con derrames lávicos y materiales volcanosedimentarios de facies de arco volcánico, alterados e intrusionados por cuerpos ígneos andesíticos, correspondiente a esquistos, filitas, cuarcitas, metareniscas y radiolaritas en facies de esquistos verdes, de edad Jurásico Medio — Superior, característicos de la secuencia volcánica — metasedimentaria de la Provincia Magmática de la Sierra Madre del Sur (Zenteno, 1998).

CAMPO VOLCÁNICO MICHOACÁN — GUANAJUATO

Hasenaka, en 1985, designa con el nombre de Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato a un grupo de edificios volcánicos situados en el sector centro — occidental de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, cuya área se estima en 40, 000 km², comprendida en los Estados de Michoacán y Guanajuato, entre las coordenadas geográficas: 18°55' — 20°30' de latitud Norte, y 99°50' — 103°20' de longitud Oeste.

Este campo volcánico está conformado por aproximadamente 100 volcanes en escudo, 1,000 conos cinerítico — monogenéticos, así como algunos domos, maars y flujos de lava, cuya composición oscila entre andesítica — basáltica, de edad Plioceno — Cuaternario, originados mediante erupciones hawaianas y strombolianas, respectivamente; la principal característica de este campo volcánico radica en que carece de estratovolcanes.

Históricamente, dicha región había sido denominada por autores antecedentes como: 1). — Provincia Volcánica Michoacana (Foshag y González, 1956); 2). — Región del Parícutín (Williams, 1950); y Campo Volcánico de Zamora (Simkin, 1981).

Estructuralmente, los edificios volcánicos indicados cuentan con una orientación general E — W como parte del sistema de fallas Morelia — Acambay (Garduño — Monroy, 2009); y NE — SW, que ha sido atribuida por el autor citado a fallamientos normales perpendiculares a la dirección principal de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, en cuyas fosas tectónicas frecuentemente se han desarrollado cuencas lacustres endorreicas, destacando el Lago de Cuitzeo y Pátzcuaro.

Por otra parte, Corona — Chávez (2006) menciona que el vulcanismo ha migrado hacia el SW debido a que en la porción NE del aludido campo volcánico las edades de los edificios volcánicos cuentan con 3 ma, mientras que en el sector SW oscilan en 1 ma.

Cuenca Lacustre de Zacapu

Reyes, en 2017, asigna informalmente el nombre de Cuenca Lacustre de Zacapu a una secuencia volcanosedimentaria pliocuaternaria constituida por tobas, derrames e ignimbritas intercalada con sedimentos lacustres aflorantes en áreas circunvecinas al poblado de Zacapu, perteneciente a la región central del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato.

Los primeros estudios detallados se remontan a Demant (1992), estableciendo que en la región aflora una secuencia volcánica constituida por tobas, ignimbritas y escasos derrames lávicos, que constituyen una serie diversa de estructuras volcánicas: escudos, domos, maares, conos cineríticos y conos monogenéticos cuaternarios; por otra parte, Kshirsagar, en 2015 y 2016, en torno a las secuencias de tobas, calcula su edad absoluta por medio del método radiométrico $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$, y obtiene las siguientes edades situadas en el Pleistoceno Inferior: flujo de lava Cerro Sanabria (4.53 ± 0.016 m.a.), volcán El Picacho Gendo (1.56 ± 0.06 m.a.), cono de escoria Cerrito Pelón (1.54 ± 0.13 m.a.), y un flujo de ignimbritas riolíticas sin nombre formacional, de 1.5 ± 0.61 m.a.; respecto al Pleistoceno Medio se registran diversos conos de escoria: Cerro Coro Grande (0.35 ± 0.013 m.a.), una serie de domos dacíticos cuyas edades oscilan entre 0.96 ± 0.029 y 1.28 ± 0.64 m.a.; para el Pleistoceno Tardío se generan conos de escoria monogenéticos andesítico — basálticos, destacando: el Molcajete de Zipiajo ($14,719 \pm 350$ AP), y Cerro Hueco ($12,750 \pm 110$ AP), así como Guadalupe ($20,275 \pm 820$ AP).

Durante el Holoceno se crean 2 estructuras: cono de escoria La Mina ($10,20 \pm 745$ m.a.), y el flujo de lava Tendeparacua ($6,105 \pm 45$ AP).

Actualmente se desconoce el basamento del campo volcánico citado, pero, sin embargo, Wilcox, en 1954, estima que su composición es de carácter riolítico debido a los xenolitos ácidos encontrados en las lavas del Parícutín.

Acuífero Uruapan

La región estudiada se sitúa en el acuífero Uruapan que, de acuerdo a CONAGUA, en el año 2020, se encuentra constituido por materiales volcánicos porosos y permeables como brechas y derrames basálticos fracturados del Terciario — Cuaternario.

De acuerdo al estudio técnico llevado a cabo por Ariel Construcciones (1980), los pozos profundos realizados en el acuífero, resultaron productores entre los 100 y 150 m con caudales entre los 5 y 10 lps, concluyendo que los caudales suministrados por los manantiales son los más representativos.

Tomando como base los datos recabados durante la perforación del pozo El Plan, ubicado en la porción SW del municipio de Cherán, que localizó el nivel estático del acuífero libre a 46 m de profundidad, CONAGUA clasifica al subsuelo en 3 unidades bien definidas:

- 1).- Alternancia de basaltos y brechas pliocuaternarias con buena permeabilidad.
- 2).- Brechas basálticas del Terciario Superior con baja permeabilidad.
- 3).- Intercalaciones de brechas y derrames basálticos y permeabilidad bastante baja.

De esta manera, es recomendable extraer el agua de acuíferos semiconfinados debido a los pocos espesores de las unidades superficiales porosas y permeables de Cherán.

Sin embargo, aludido a la reciente actividad volcánica de la Meseta Purépecha, la acumulación de agua en el subsuelo se desarrolla acorde a la topografía superficial, almacenándose en los contactos de las unidades permeables e impermeables.

Acuífero Zamora

Se localiza al NW de la Meseta Tarasca, y corresponde a una de las zonas de descarga hídrica de la misma.

Al igual que el área citada, lo conforman derrames basálticos fracturados, piroclastos, aluviones y, además, depósitos lacustres de edad Plioceno — Holoceno; su nivel estático oscila entre los 5 a 30 m de profundidad.

De acuerdo a análisis químicos llevados a cabo por CONAGUA (2020), de un total de 100 muestras tomadas en pozos piloto, las familias de aguas subterráneas existentes en la región son: sódica bicarbonatada (61%), magnesiana bicarbonatada (27%), y mixta bicarbonatada (12%), características de ambientes volcánicos, asociando que es de buena calidad y apropiada para uso doméstico.

Por otra parte, la región exhibe termalismo aludido a la interacción de cámaras magmáticas del Eje Neovolcánico con el acuífero, evidenciado por la presencia de manantiales termales cuyas temperaturas rebasan ligeramente las ambientales, hasta llegar a los 95°C en Ixtlán de los Hervores; y geiseres, ambos alineados a través de fallamientos normales.

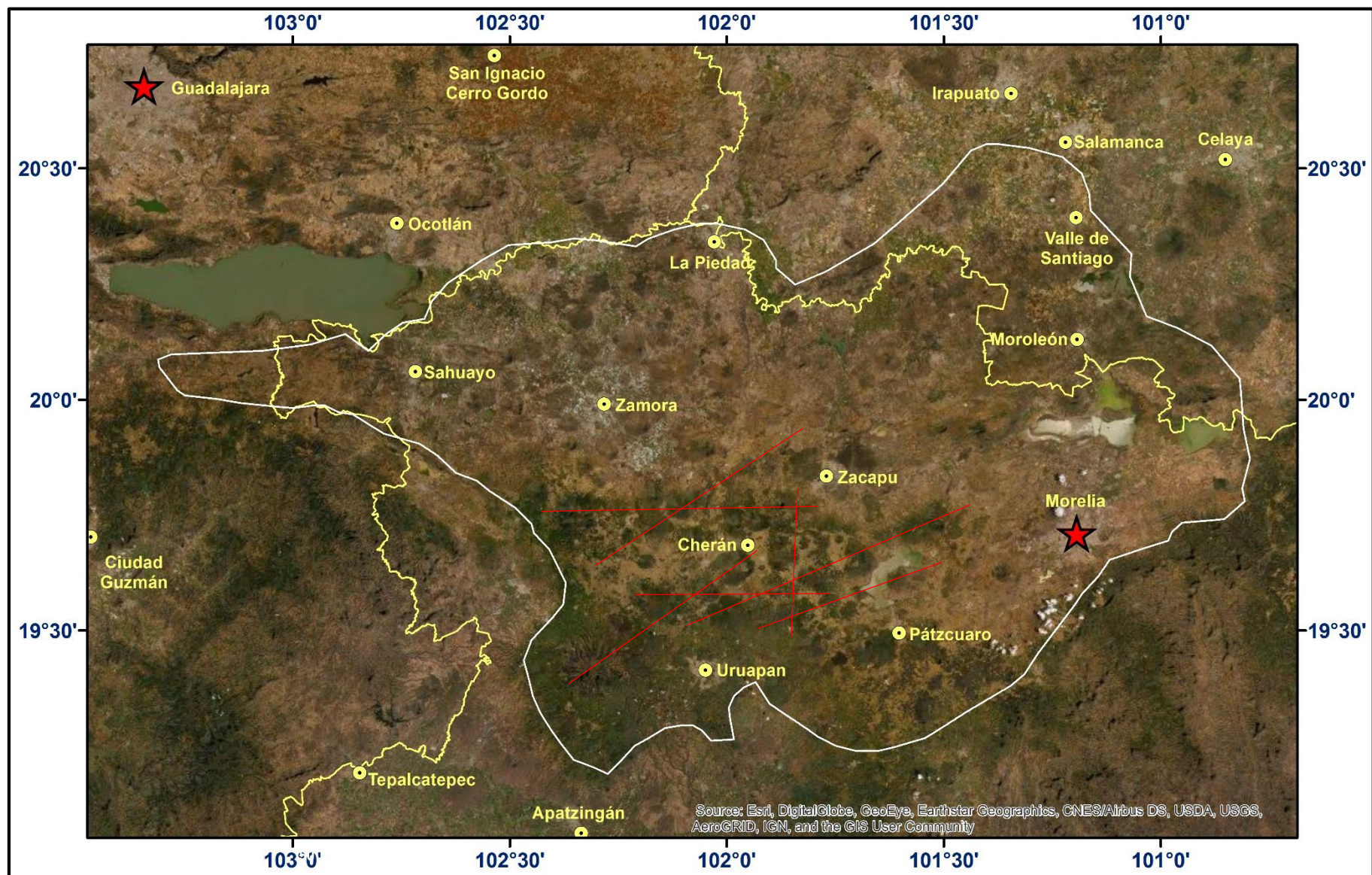


Figura 2.2, fotografía satelital del sector noroccidental del Estado de Michoacán, mostrando en línea color blanco los límites del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato, y en línea amarilla los límites estatales. Modificado de: Esri, 2020; Hasenaka, 1985.

3. ESTRATIGRAFÍA

En los recorridos geológico — exploratorios realizados en la región purépecha de Cherán, Michoacán, se identificó una secuencia volcánica extrusiva de características andesítico — basáltico, y edad Plioceno Superior — Holoceno, constituida por derrames lávicos, tobas y cenizas de 200 m de espesor, cuyas geoformas corresponden a conos monogenéticos de: escoria, ceniza y compuestos; así como volcanes en escudo y derrames de lava individuales.

De acuerdo a Manriquez — Espino (2018), las sucesiones litológicas aflorantes en Cherán, sobreyacen discordantes a derrames basálticos y volcanosedimentarios (escorias, lapillis, bombas) de volcanes escudo cuya edad atribuye en Plioceno Medio — Inferior.

A su vez, esta secuencia descansa discordante a tobas y derrames basálticos Oligoceno — Mioceno, denominados por Israde (2008), como Complejo Mil Cubres, cuyos afloramientos más representativos se encuentran en las cuencas lacustres de Pátzcuaro y Cuitzeo, y se caracterizan por formar volcanes en escudo.

Sin embargo, debido a que en la región estudiada las unidades estratigráficas citadas carecen de nombres formacionales, y en trabajos antecedentes únicamente se les menciona como sucesiones de derrames, tobas y cenizas pliocuaternarias, el autor de la presente tesis les asigna informalmente los nombres de: Cheranástico, Cherán, y El pino, tomando como localidades tipo a los poblados homónimos, emplazados alrededor de la comunidad de Cherán, basándose en los artículos 3 — 16 del Código Estratigráfico Norteamericano, publicado en el año 2010. De la base a la cima, las unidades mencionadas se describen a continuación, y se ilustran en la figura 3.1.

COMPLEJO MIL CUMBRES

Corresponde a la unidad estratigráfica expuesta más antigua de la región, su edad se establece en Oligoceno — Mioceno, y aflora en la cuenca lacustre de Pátzcuaro, situada al NE de Cherán.

La componen tobas, ignimbritas y derrames basálticos color ocre al intemperismo y gris oscuro al fresco, en capas medianas a gruesas (50 cm – 1m de espesor) con una potencia de 250 m, conformando volcanes en escudo y conos monogenéticos característicos del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato, bordeando la cuenca lacustre mencionada, y en ocasiones forman la base a pequeños islotes dentro de esta.

De acuerdo a Armas — Vargas (2010), al Complejo Mil Cumbres le sobeyace una secuencia de derrames y materiales volcanosedimentarios basálticos de edad Plioceno Inferior que conforman volcanes escudo, e infrayace discordante a la secuencia volcánica de Cherán, cuyos contactos se observan en la carretera federal número 15 Zamora — Chilchota.

FORMACIÓN EL PINO

La constituyen tobas arenosas y limolíticas de grano medio a grueso en estratificación mediana (15 a 20 cm de espesor) de características andesíticas, color amarillo ocre al intemperismo y gris al fresco, depositadas mediante flujos piroclásticos y emisiones volcánicas; su porosidad y permeabilidad corresponden al 25% y son deleznable al golpe del martillo.

Aflora en el Valle de Cherán, y aflora en el fondo de las cárcavas que afectan a la secuencia característica de la región, mientras que en el trayecto Tangancicuaro — Chilchota — Cherán se le observa sobreyaciendo discordante al Complejo Mil Cumbres (Oligoceno — Mioceno), por la que se le asigna una edad Plioceno Medio — Superior, y un espesor medido de 25 m.

FORMACIÓN CHERÁN

Aflora en el Valle homónimo, y sus afloramientos más representativos se localizan en los derrames lávicos de los volcanes escudo que lo rodean y en el fondo de los accidentes estructurales (cárcavas); se encuentra constituida por dos miembros: uno lávico compuesto por derrames basálticos color gris oscuro al fresco y gris ocre al intemperismo, en capas potentes de 1 m de espesor que conforman edificios

volcánicos en escudo y flujos de derrames aislados al pie de estos; su espesor medido corresponde a 90 m.

Al segundo miembro lo componen depósitos cineríticos basálticos color gris oscuro al fresco y gris ocre al intemperismo, en estratificación delgada a laminar (1mm — 2 cm de espesor), impermeable, poco consolidada y deleznable al golpe del martillo, cuyo espesor medido se asigna en 10 m.

Al sobreyacer concordante a la Formación El Pino, su edad se designa en Plioceno Superior — Pleistoceno Inferior.

FORMACIÓN CHERANÁSTICO

Tobas andesíticas areno — limolíticas, color amarillo al fresco y pardo al intemperismo, estratificadas en capas medianas a gruesas (15 a 20 cm de espesor), mal consolidadas, porosas, permeables y deleznales al golpe de martillo. Al ser la unidad estratigráfica más reciente, aflora en el Valle de Cherán y valles circunvecinos, y, por posición estratigráfica, al sobreyacer a la Formación Cherán, su edad es asignada en Pleistoceno Medio — Superior, contando con un espesor medido de 30 m.

BASAMENTO

El basamento de la secuencia volcánica aflorante no fue observado en la región debido a que no se encuentra aflorando, pero por correlación con localidades cercanas enclavadas en las regiones Tzizio y Apatzingán, Michoacán, localizadas en la porción centro — occidental de la Provincia Geológica del Cinturón Orogénico Guerrero — Colima (Sierra Madre del Sur), se establece que corresponde a estructuras de deformación laramídicas.

Dichas estructuras se constituyen por carbonatos marinos Cretácico Medio — Cretácico Superior correspondientes a las facies de aguas profundas de la Plataforma de Huetamo, aflorantes al SE de Cherán, muy deformadas debido a la Orogenia Laramide (Guerrero — Suástegui, 1997; Montiel — Escobar, 2000; Pantoja — Alor, 2003), comprendidas por las formaciones: Angao, San Lucas, El Cajón, Mal Paso, y Cutzamala.

En los sinclinales de las estructuras laramídicas se encuentra la Formación Balsas, integrada por clastos carbonatados provenientes de los anticlinales circundantes, y depositados en ambientes lacustres.

Por otra parte, las rocas más antiguas registradas conciernen a la secuencia volcanosedimentaria metamórfica del Terreno Tectonoestratigráfico Guerrero (Campa y Coney, 1983), cuyas rocas eruptivas Triásico Superior — Jurásico Inferior infrayacen a facies de arco volcánico intercaladas con carbonatos marinos de aguas profundas y turbiditas del Jurásico Superior — Cretácico Medio (Bajoniano — Cenomaniano) en facies metamórficas de esquistos, cuarcitas y radiolaritas, denominadas por Centeno, en 1992, como Complejo Arteaga, afectadas por cuerpos plutónicos contemporáneos al desarrollo del Arco Volcánico de Amengarícuaro.

Sin embargo, dicho complejo ha sido nombrado por Montiel — Escobar, en el año 1998, como Complejo Carácuaro, y Pantoja — Alor (2003), como Formación Río Placeres.

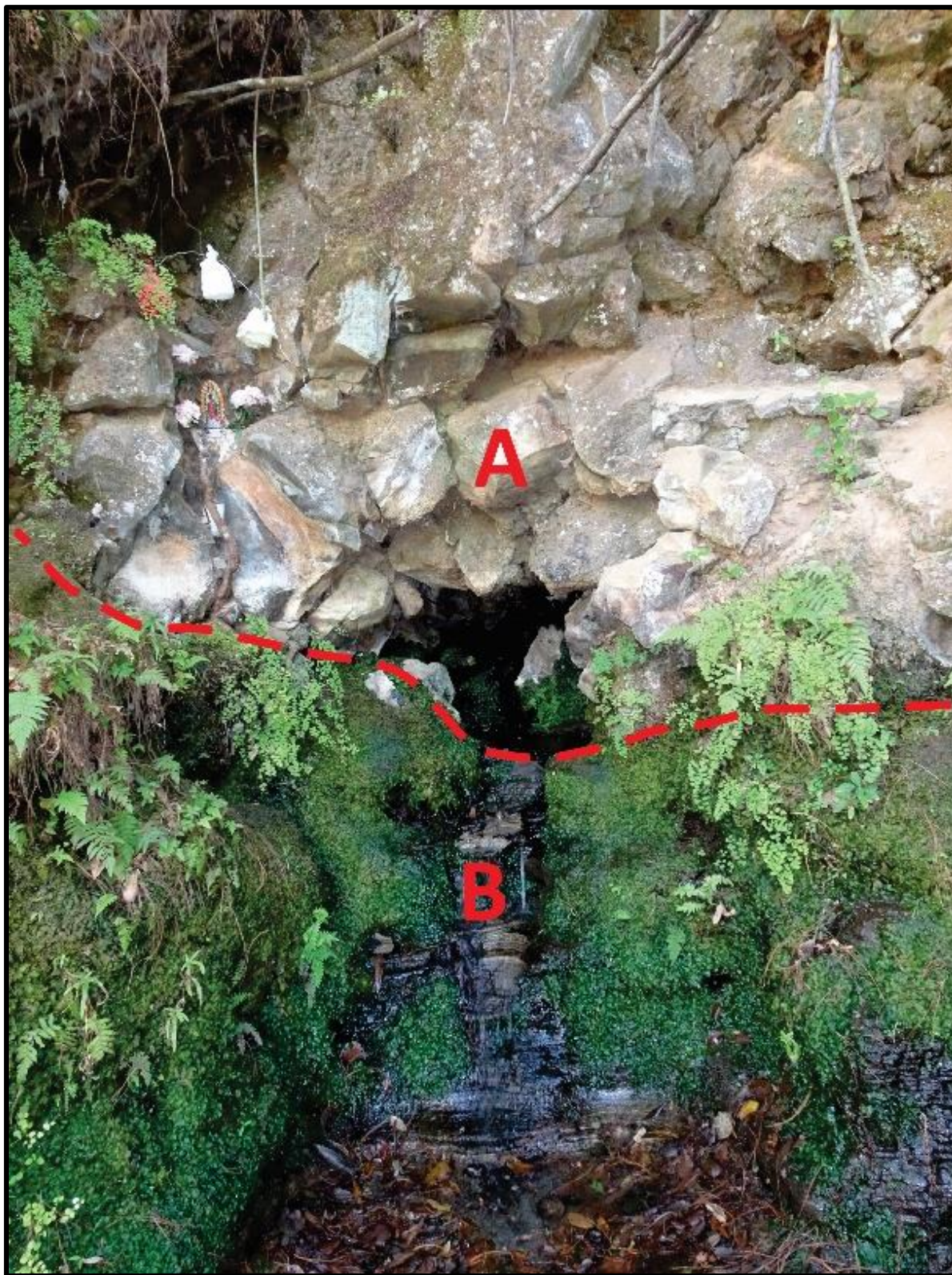


Figura 3.1, contacto litológico del miembro lávico (A), y cinerítico (B) de la Formación Cherán. Manantial Cofradía, Cherán, Michoacán.

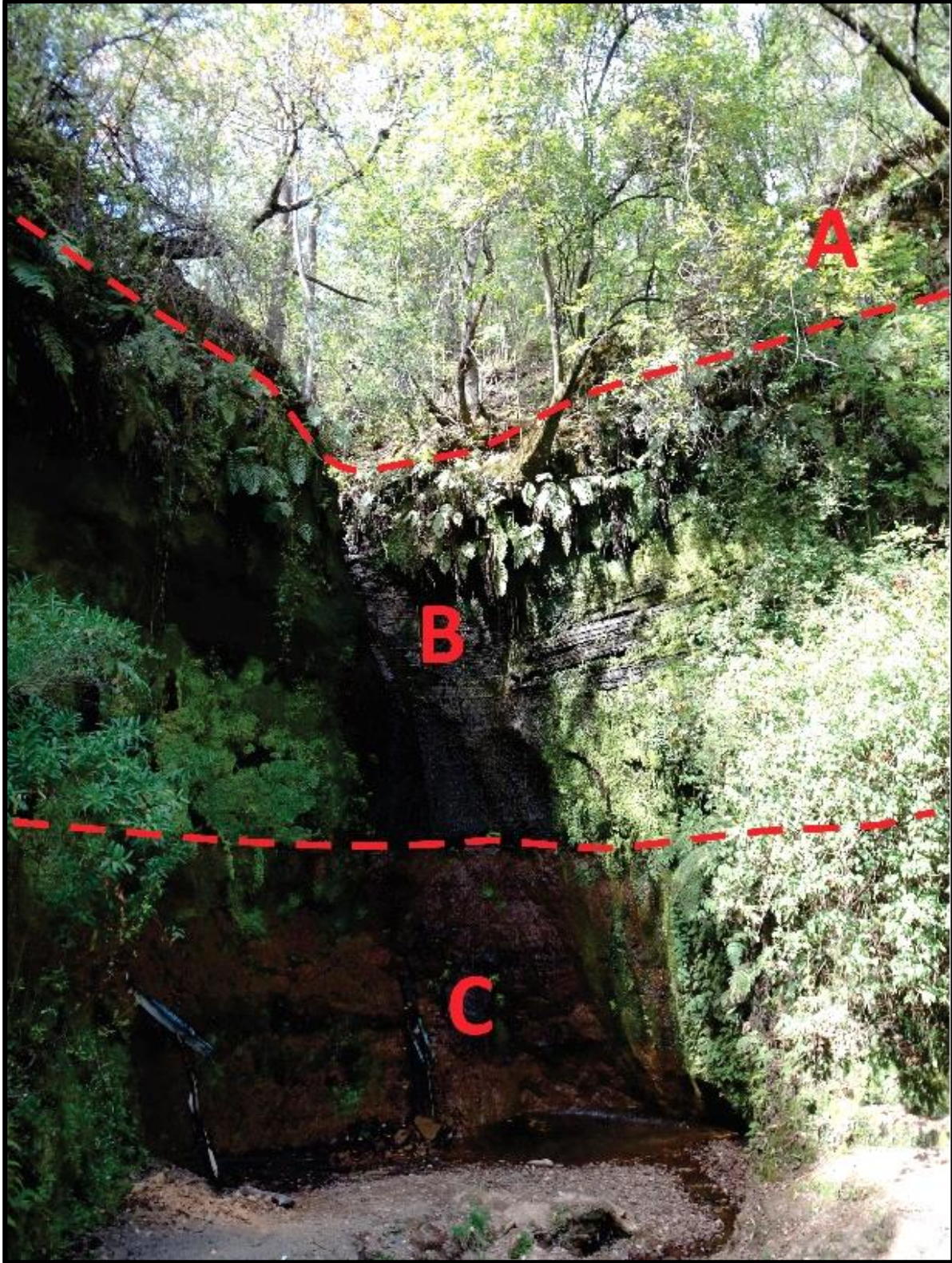


Figura 3.2, contacto litológico de las formaciones Cheranástico (A), Cherán (B), y El Pino (C). Manantial Uécuaro, Cherán, Mich.

4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la Región Cherán, se identificó un modelo estructural distensivo, integrado por una serie de fallamientos normales de orientación NE — SW con caída a los cuadrantes NW y SE, originando un conjunto tectónico de fosas y pilares particular de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (Eje Neovolcánico).

De esta manera, el pilar más representativo se localiza en Cherán al corresponder al de mayor altitud, y en la presente tesis se le asigna de manera informal el nombre de Alto de Aranza, al cual circunscriben una serie de fosas tectónicas, también denominadas informalmente como fosas de: Zamora, Tangancícuaro, Chilchota, y Nahuatzén, en la región estudiada.

De acuerdo al trabajo de Hasenaka, publicado en 1985, los fallamientos NE — SW referidos conciernen a las discontinuidades corticales que dieron origen al Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato y, debido a la longevidad de las estructuras volcánicas más antiguas de la región (volcanes en escudo), observadas en Jiquilpan — Cherán, y que adoptan esta tendencia, su edad queda establecida en Oligoceno — Holoceno, fundamentado en que los edificios volcánicos aludidos se encuentran muy erosionados en la cima, en ocasiones dejando expuesta su chimenea, identificándose además conos cineríticos pliocuaternarios que descansan discordantes sobre su cima.

Por su parte, Israde *et al* (1999), atribuye el sistema de fallas del campo volcánico citado al denominado Corredor Tarasca, mismo que cuenta con una dirección NE — SW, y cuyos extremos se localizan en la costa del Océano Pacífico, y la Ciudad de Querétaro, respectivamente.

De igual manera, se reconoció un sistema secundario de fallamientos normales E — W con caída al N y S, que afecta a la secuencia ígnea extrusiva regional, y que corresponde a los fallamientos principales de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (Eje Neovolcánico) que, de acuerdo a Ortega — Gutiérrez *et al*, en el año de 1992, y Garduño *et al*, en 1993, generan una serie de fosas tectónicas de la misma orientación a lo largo de sus sectores occidental y central,

desarrolladas durante el periodo Mioceno Medio — Plioceno Superior, como consecuencia de los movimientos compresivos y distensivos que ocasionó la subducción de geometría oblicua del sistema Cocos — Norteamérica.

Dichas fosas, al encontrarse de igual manera limitadas por altos estructurales, acumularon cantidades considerables de agua hasta crear cuencas lacustres endorreicas que fueron rellenadas por materiales volcanosedimentarios y sedimentos lacustres; en algunos casos su existencia se prolonga hasta la actualidad, como los lagos de Chapala y Cuitzeo.

Respecto a este sistema de fallas, Demand, en 1979, lo incluye dentro del Sistema de Fallas de Chapala, citando que corresponde a la prolongación continental la Falla Clarión.

Caben resaltar los trabajos de Nixon (1982), Lurh (1985), y Allan (1991), en los cuales refieren la existencia de un punto triple en el sector occidental del Eje Neovolcánico que se encuentra en las primeras fases de un rompimiento continental, y es evidenciado por los grandes lineamientos NW — SE, E — W y NE — SW de los sistemas de fallas Mazatlán — Pochotitlán, Chapala y Colima.

Sin embargo, una discusión aludida al origen del Eje Neovolcánico en los trabajos referidos, y a las investigaciones de Moser (1958,), Demand (1981), Campa y Coney (1983), Zenteno (1998), Sheth y Verma (2002) se encuentra fuera de los objetivos de esta tesis.

Por otra parte, también se reconoció un tercer sistema de fallas, orientado NW — SE, que se asocia la bifurcación del sistema NE — SW, y origina fosas tectónicas de geometría triangular, cuyo exponente más notable se localiza en Cherán.

Ante los distintos sistemas de fallamientos normales característicos de la región estudiada, los grabens denominados informalmente por el autor, conocidos como las fosas de: Zamora, Tangancícuaro, Chilchota, y Nahuatzén, de orientación NE — SW, y con una altitud promedio de 1,715 msnm para Zamora — Tangancícuaro, y de 2,250 msnm para la última, son bordeadas por edificios volcánicos andesítico —

basálticos de edad Oligoceno — Holoceno que fueron erigidos en los cruces de los sistemas de fallas citados.

De esta manera, la secuencia volcánica aludida, constituida por tobas, derrames, cenizas e ignimbritas, así como el Complejo Mil Cumbres, sobreyace discordante a una serie de estructuras de deformación laramídicas constituidas por carbonatos marinos de aguas profundas y sedimentos flysh de la Plataforma de Huetamo, los cuales se encuentran aflorando al SE de Cherán (figura 4.1).

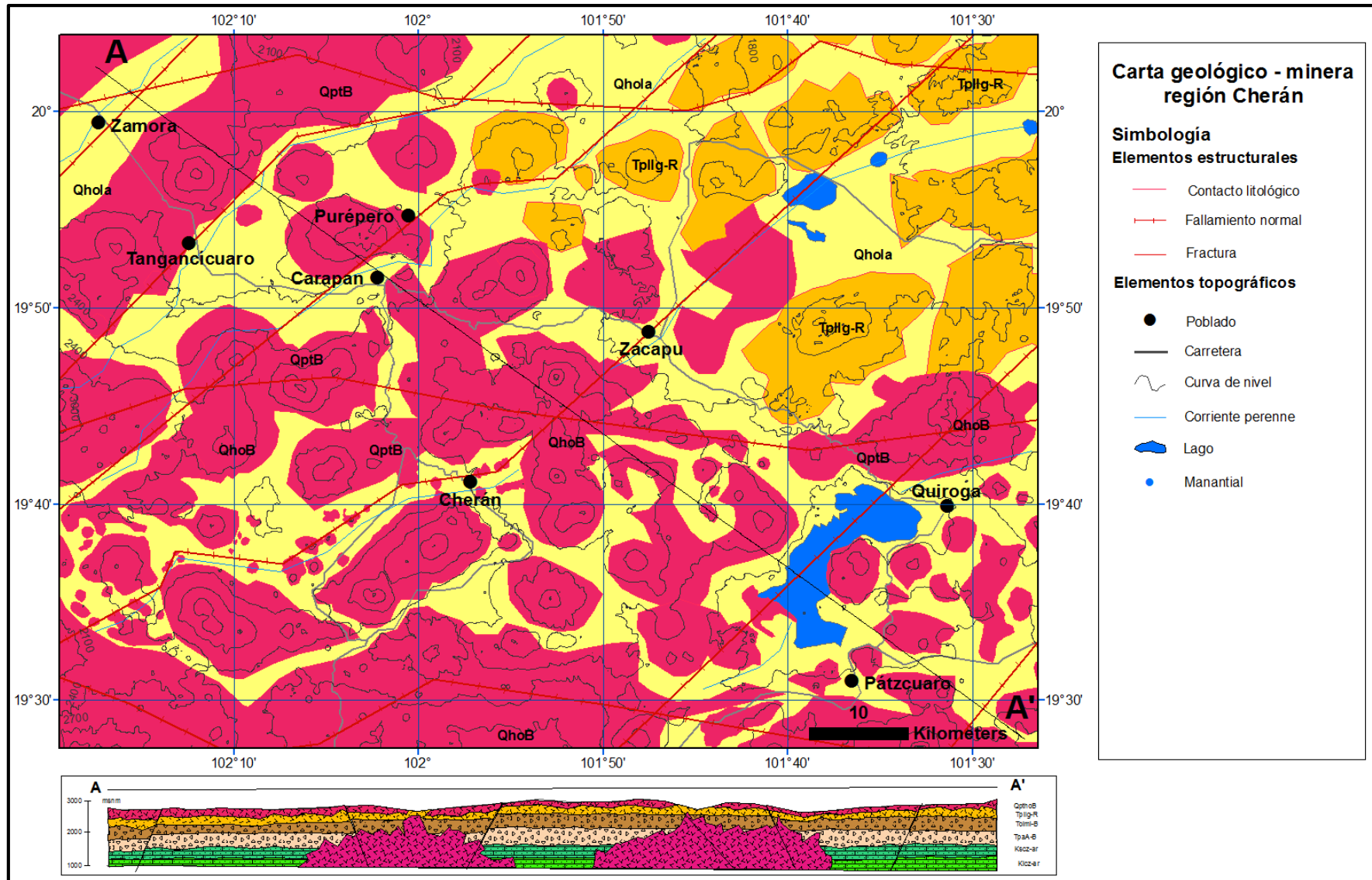


Figura 4.1, carta geológico — minera de la región purépecha de Cherán, mostrando la predominancia de edificios volcánicos de orientación NE — SW de edad Plioceno — Holoceno, correspondientes al Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato. El basamento se muestra en la sección A — A', y comprende carbonatos marinos de la Plataforma de Huetamo, en el flanco SW de una estructura anticlinal. Modificado de: SGM, 1998, Esri, 2020.

5. GEOHIDROLOGÍA

El sistema hidrológico característico de la Región Cherán se desarrolla en una sucesión volcanosedimentaria constituida por tobas, derrames, cenizas e ignimbritas andesítico — basálticas Oligoceno — Holoceno, que conforman volcanes en escudo, domos, y conos monogenéticos, pertenecientes al Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato, desarrollado en la porción occidental de la Provincia Geológica de la Faja Volcánica Transmexicana.

Debido a que el poblado de Cherán se localiza en una de las zonas de mayor elevación regional, con una altitud máxima de 3,200 msnm, y a que se enclava en uno de los horst más representativos, denominado informalmente como Alto de Aranza, corresponde a la zona de recarga del sistema hidrológico, y los edificios volcánicos circundantes al poblado citado establecen la función de un parteaguas que divide a las cuencas de los ríos: Duero, Paracho, Cupatitzio, Lago de Pátzcuaro, y Angulo, así como a cuatro acuíferos diferentes: Zamora, Zacapu, Lagunillas de Pátzcuaro, y Uruapan (CONAGUA, 2020).

Por otra parte, la zona de descarga se sitúa en los bajos estructurales circundantes, a altitudes oscilantes entre 1,600 y 1,900 msnm, cuyas tobas y aluviones porosos permiten la filtración, almacenamiento y flujo de agua al subsuelo.

De esta manera, las unidades acuíferas corresponden a basaltos fracturados y cavernas de colapso (porosidad secundaria), así como ductos desarrollados durante el movimiento y enfriamiento de las lavas, de igual manera que a tobas arenosas andesíticas de porosidad primaria (intergranular), mientras que las formaciones impermeables representan una secuencia de cenizas basálticas.

De acuerdo a los puntos anteriores, las unidades estratigráficas aflorantes de la región Cherán son descritas a continuación desde el punto de vista geohidrológico:

Formación Cheranástico: Corresponde a la formación más reciente y debido a su porosidad, permeabilidad, y al estar compuesta por tobas arenosas, representa una unidad acuífera.

Formación Cherán: Su miembro lávico presenta porosidad de fractura e interconexión por vesículas, juntas, ductos, cavernas y fallamientos normales, por lo tanto, representa la capa almacenadora de agua; en contraparte, su miembro cinerítico, al carecer de porosidad, permeabilidad, y encontrarse compactado, figura la capa impermeable del sistema hídrico.

Formación El Pino: Al encontrarse constituida por tobas arenosas, presentar porosidad y permeabilidad, tiene la capacidad de almacenar agua (acuífera).

MANANTIALES

En el poblado de Cherán y áreas contiguas se identificó una serie de 16 manantiales de bajo caudal y agua dulce localizados tanto en los bordes de los edificios volcánicos en escudo y derrames lávicos, así como en las cárcavas del valle, que ocurren en el cruce de dos fallamientos principales NE — SW con caída al SE, con el sistema de fallamientos normales E — W, y su bifurcación NW — SE.

Los manantiales establecidos en los bordes de los edificios volcánicos mencionados ocurren en el contacto del miembro lávico de la Formación Cherán (porosidad de fractura), con su miembro cinerítico (impermeable), a una altitud medida comprendida entre las cotas de 2,600 y 2,700 msnm, en pendientes menores a 20° de inclinación (figuras 5.4 — 5.7), y el flujo de agua corre a través de ductos volcánicos ocasionados por el enfriamiento diferencial de las capas superiores de lava; así como a través de los fallamientos NE — SW y juntas de enfriamiento de dichas lavas.

Además, debido a la porosidad y permeabilidad de la Formación Cheranástico, esta llega a contener agua subterránea en acuíferos libres locales que, al ser transmitida en el contacto con el miembro cinerítico de la Formación Cherán, también origina una serie de manantiales en Barranca Grande, localizada en la porción NW del poblado, y corresponde al paso de la Falla Cherán.

Por otra parte, los manantiales de la fosa de Nahuatzén, ocurren en los pasos de fallamientos secundarios NE — SW atribuidos al movimiento de las fallas principales de dicho sistema, y se localizan en el contacto de la Formación Cheranástico

(porosidad intergranular), con el miembro cinerítico de la Formación Cherán (impermeable), entre las cotas de 2,100 y 2,500 msnm (figura 3.1).

En las fosas tectónicas de Zamora, Tangancícuaro, y Chilchota, localizadas al NW de Cherán (zona de descarga), también se localiza una serie de manantiales orientados NE — SW, cuyas surgencias de agua, situadas en el suelo, han ocasionado que esta se almacene alrededor de ellas, originando una serie de estanques, entre las cotas 1,600 y 1,900 msnm (figura 5.2).

A diferencia de los manantiales de Cherán, las surgencias de agua de los manantiales de las fosas tectónicas de Zamora, Tangancícuaro y Chilchota, no se encuentran en contacto litológicos permeables/impermeables, sino que el agua asciende desde el acuífero libre (Formación Cheranástico) hacia la superficie de la misma por medio de fallamientos normales NE — SW, debido a que dicha zona se localiza casi inmediatamente a la zona de recarga y debajo de su nivel freático, por lo que su caudal es mayor.

Esta característica es notable en la Presa La Luz, y los estanques Cupátziro, y Ostácuaro, donde, aludido a la claridad del agua, las zonas de surgencia son observadas directamente en el fondo de los mismos, y se alinean en una dirección NE45°SW, y dicha surgencia ocasiona que los sedimentos del fondo se agiten alrededor de ellas.

De acuerdo a la clasificación de Bryan, realizada en 1919, y Meinzer (1923 y 1927), los manantiales de la zona de recarga y descarga son catalogados de la siguiente manera:

Región Cherán			
Manantial	Bryan (1919 a)	Bryan (1919 b)	Meinzer (1923)
Aguablanca	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Achuniro	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Cofradía	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
El Pajarito	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
El Pajarito 2	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
El Plan	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Guichkarcua	Gravitacional, Guichkarcua	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Huanaztacun	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Hueratiro	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Karatzizaru	Gravitacional, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Kokunicata	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Madroño	Gravitacional, de contacto, tubular	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Minitaro	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Tendeparacua	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Uecuaro	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Zipiatiro	Gravitacional, de contacto	Perenne, no termal	Drenante, emergente
Región Tangancicuaro — Chilchota — Zamora			
Cupatziro	Gravitacional, de depresión	Perenne, no termal, estanque	Drenante, emergente, depresión
Pres La Luz	Gravitacional, de depresión	Perenne, no termal, estanque	Drenante, emergente, depresión
Ostacuaro	Gravitacional, de depresión	Perenne, no termal, estanque	Drenante, emergente, de contacto

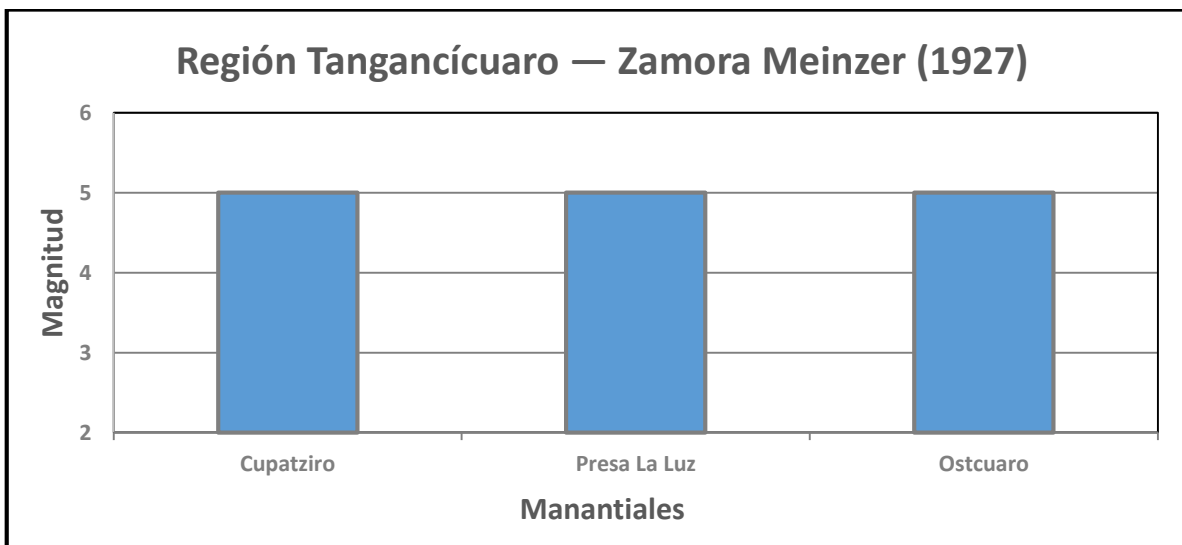
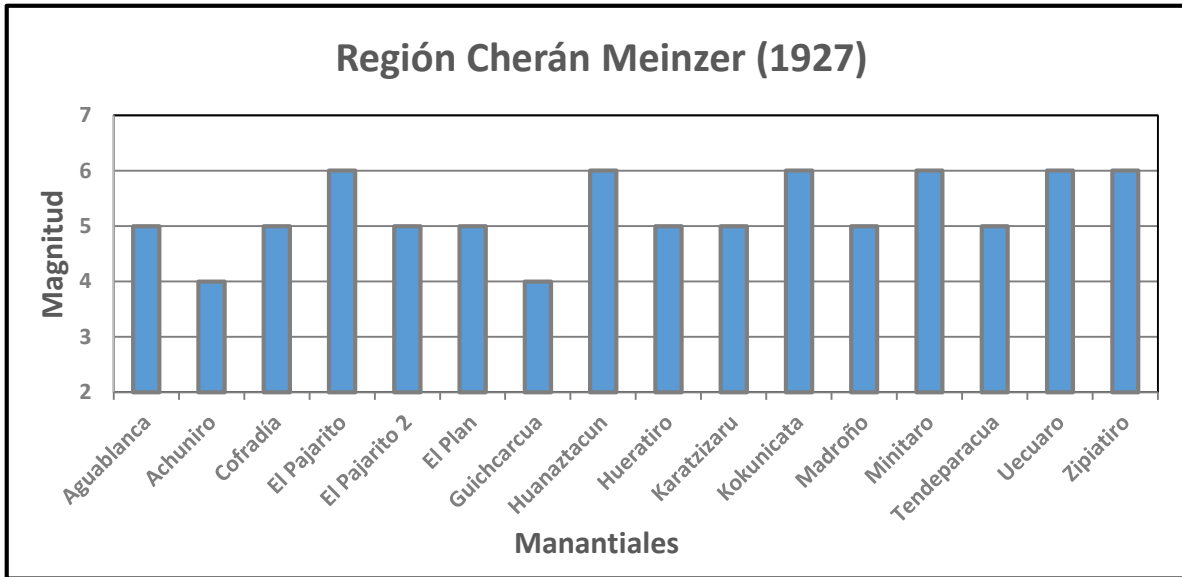


Figura 5.1, clasificación de los manantiales de la zona de recarga y descarga del área estudiada.

ACUÍFEROS

Las condiciones geológicas distintivas de los manantiales de la zona de recarga del sistema hidrológico regional, aunado a su localización en un alto estructural, y a las unidades estratigráficas constituidas por tobas, cenizas y derrames lávicos de los edificios volcánicos de su porción más elevada, indican la presencia de acuíferos locales en los pasos de las fallas NE — SW y pendientes menores a 5° de inclinación.

A su vez, el agua pluvial desciende al subsuelo por medio dichos accidentes y poros de las tobas, almacenándose en las juntas de enfriamiento, ductos y cavernas de las lavas de la Formación Cherán (porosidad de fractura), y poros de las tobas (porosidad primaria) hasta llegar al contacto con su unidad cinerítica, que funge como límite de dichos acuíferos (capa impermeable), entre las cotas de 2,600 y 2,700 msnm.

Ante esta situación, y debido a que la porosidad de fractura ocasionada por los fallamientos y las juntas de enfriamiento interconectadas, permiten el flujo de agua hacia niveles topográficos menores, donde al llegar a los bordes de las estructuras volcánicas en escudo es drenada mediante manantiales de cuarta a sexta magnitud, dichos acuíferos se catalogan como acuitardos, puesto que permiten el flujo de agua, y también como acuíferos libres.

Por otra parte, el conjunto de estos acuíferos locales también se cataloga como un acuífero colgado, ya que se sitúa en una porción elevada que es drenada mediante manantiales que llevan el agua hacia el acuífero principal, es decir, a la Fosa de Nahuatzén, en niveles topográficos menores.

El agua que es llevada hacia la Fosa de Nahuatzén, es transmitida al subsuelo debido a la gran porosidad de la Formación Cheranástico, cuyas tobas andesíticas constituyen la roca madre de los andosoles de dicha fosa, hasta el contacto con el miembro cinerítico de la Formación Cherán, que nuevamente funge como capa impermeable, almacenando el agua en la Formación Cheranástico, y, al permitir una mayor movilidad del agua debido a su homogeneidad, porosidad intergranular y

secundaria ocasionada por los sistemas de fallas, es catalogada como un acuífero libre.

Esta característica es observada en el manantial Urécuaro, localizado en una de las cárcavas principales de Cherán (figura 3.1), donde la surgencia de agua se localiza en el contacto litológico citado, y corresponde a una magnitud 6, de acuerdo a la clasificación de Meinzer, en 1927.

Finalmente, el agua contenida en el subsuelo se mueve hacia los bajos estructurales aledaños a la zona de recarga del Alto de Cherán principalmente por medio del sistema de fallamientos regionales NE — SW, donde es almacenada en pasos de fallas y juntas de enfriamiento de la Formación Cherán, hasta llegar a las fosas tectónicas, donde la Formación Cheranástico corresponde a la unidad almacenadora, y nuevamente origina un acuífero libre limitado por la unidad cinerítica de la Formación Cherán, y que abastece a los estanques y cuerpos lacustres citados por medio de manantiales en depresión, de contacto, y tubulares.

Respecto al poblado de Cherán, y los ubicados en la Fosa de Nahuatzén, atribuyendo las características geohidrológicas descritas, los acuíferos principales se localizan en el límite SE de Cherán, en el cruce de la falla NW — SE y caída al SW, con otra NE — SW con caída al NW, atribuido a que se sitúa en un nivel topográfico inferior (2,300 msnm); las formaciones Cheranástico y Cherán (miembro lávico), así como pendientes menores a 15° en dicho sector, permiten que los flujos superficiales y subterráneos se dirijan hacia ese lugar, haciendo posible el almacenamiento de agua tanto para acuíferos superficiales como profundos, pues, referido al estudio de Rodríguez — Tapia (2020), el agua subterránea se mueve y almacena conforme a la topografía superficial, en este caso, en pendientes entre los rangos de 0 a 5° de inclinación (figuras 5.3 — 5.5).

Dicha aseveración se corrobora debido a que en el manantial Uécuaro se observó que la fosa tectónica citada se compone por tobas arenosas de las Formaciones Cheranástico y El Pino, limitadas por las cenizas de la Formación Cherán.

Por otra parte, dado que las formaciones Cheranástico, Cherán, y El Pino se encuentran en la zona de recarga y descarga del sistema hidrológico, la Formación El Pino, origina un acuífero semiconfinado, pues en el manantial Urécuaro y las cárcavas de la Fosa de Tangancícuaro se le observó infrayaciendo en contacto abrupto al miembro cinerítico de la Formación Cherán, y el agua que almacena proviene de su conexión con el acuífero libre mediante los fallamientos normales del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato, que desciende hasta el contacto con unidades cineríticas del Complejo Mil Cumbres, que fungen como unidad impermeable.

Esta característica es evidenciada mediante la acumulación de agua del Lago de Pátzcuaro, localizado al SE de Cherán con una altitud de 2,100 msnm, que drena el acuífero homónimo y su capa impermeable se encuentra compuesta por cenizas del Complejo Mil Cumbres, que en el área citada se encuentra aflorando.

Sin embargo, pese a las fuertes precipitaciones del sistema hidrológico regional, gran porosidad de los suelos y diversos sistemas de discontinuidades, el poco espesor de la Formación Cheranástico (30 m), no resulta atractivo para su explotación con fines de abastecimiento a la población, lo recomendable es recurrir a los acuíferos confinados/semiconfinados del subsuelo.

Basamento

Tomando como referencia el trabajo de Armas — Vargas (2010), el basamento geohidrológico del sistema Cherán queda representado por derrames andesíticos impermeables de edad Mioceno Superior del Complejo Mil Cumbres, identificado a 300 m de profundidad mediante estudios geofísicos efectuados en la Fosa de Zamora.

De esta manera, los acuíferos profundos regionales se sitúan en derrames basálticos fracturados Plioceno Inferior, cuyo basamento corresponde a derrames andesíticos impermeables.



Figura 5.2, fotografía mostrando en línea color rojo la alineación NE — SW de las surgencias de agua en la zona de descarga del Alto de Cherán, que adquieren una tonalidad azul claro. Manantial Cupátziro, Tangancícuaro, Mich.

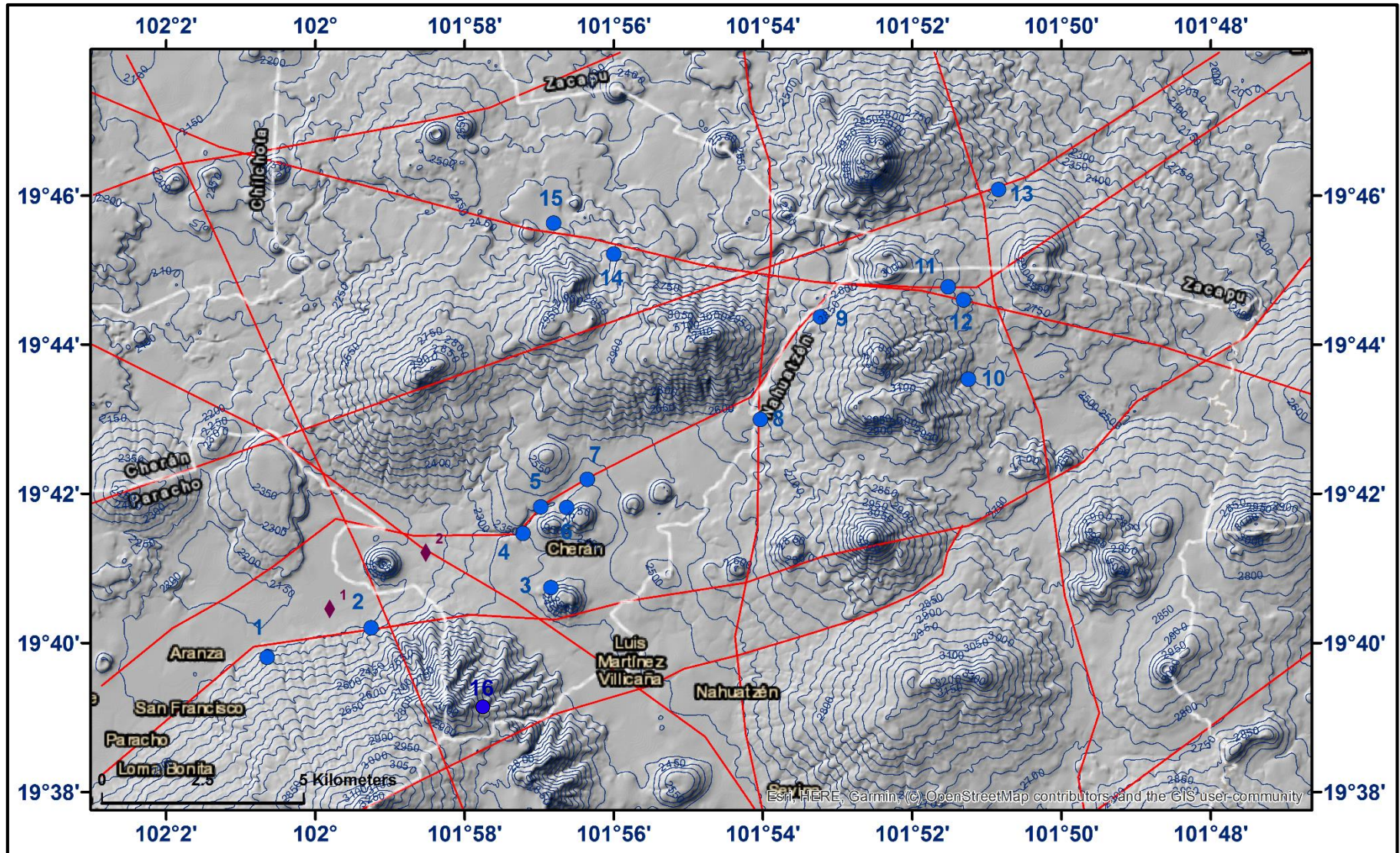


Figura 5.3, plano de sombras de la Región Cherán, mostrando las fallas normales en color rojo, límites municipales en blanco, pozos productores en rombo color púrpura, curvas de nivel en línea azul, y manantiales en punto azul: 1).- Hueratiro, 2).- El Plan, 3).- Kokunicata, 4).- Uichkarakua, 5).- Uékuaro, 6).- Tendeparacua 7).- Achuniro 8).- La Cofradía, 9).- Ziptatiro, 10).- Minitaro, 11).- El Pajarito 2, 12).- El Pajarito, 13).- Madroño, 14).- Aguablanca, 15).- Huanaztacun, 16).- Karatzitzaru.

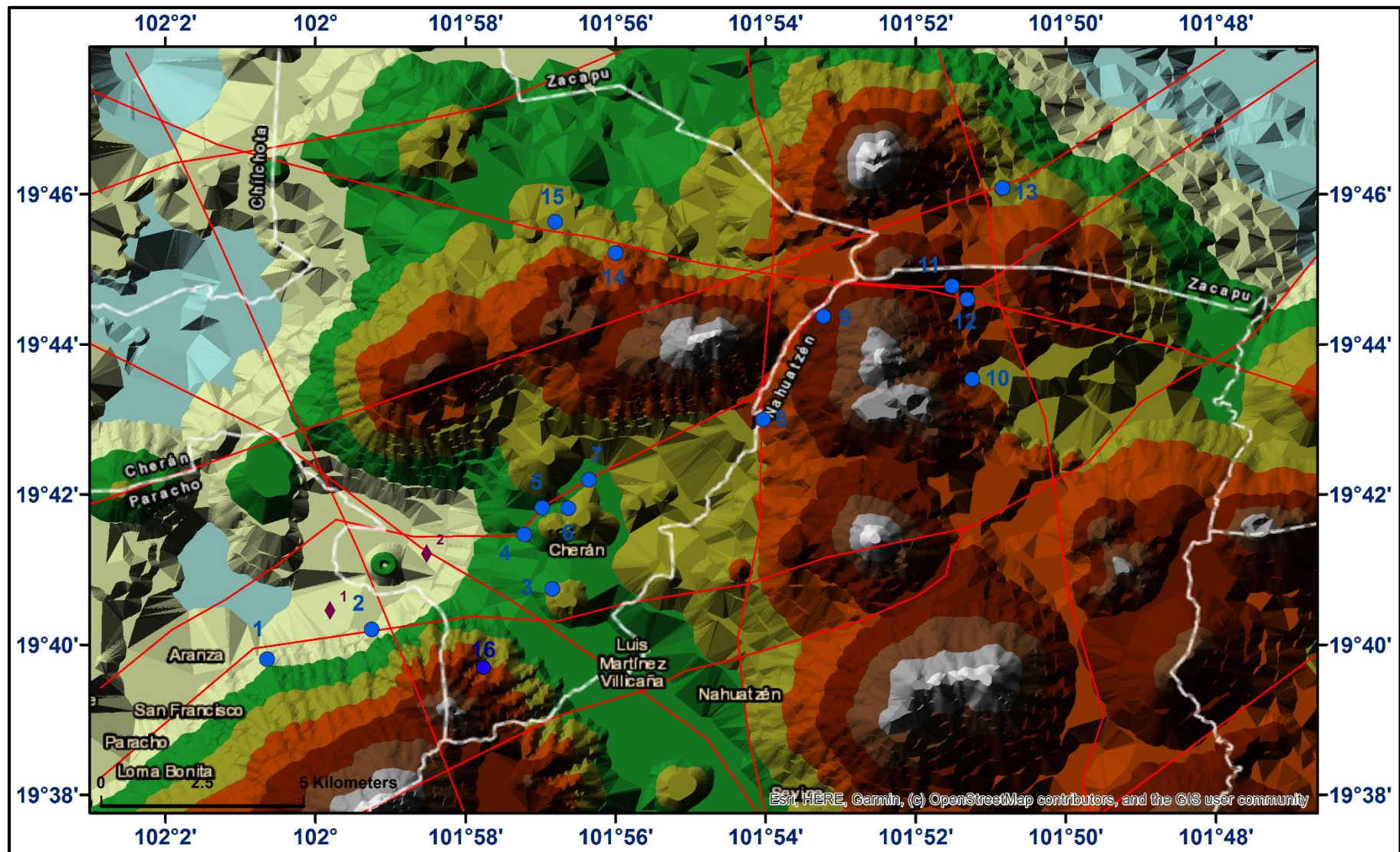


Figura 5.4, plano de red irregular de triangulación de la zona de recarga de la región Cherán, mostrando las fallas normales en color rojo, límites municipales en blanco, pozos productores en rombo color púrpura, y manantiales en punto azul: 1).- Hueratiro, 2).- El Plan, 3).- Kokunicata, 4).- Guichcarcua, 5).- Uécuaro, 6).- Tendeparacua 7).- Achuniro 8).- La Cofradía, 9).- Zipiatiro, 10).- Minitaro, 11).- El Pajarito 2, 12).- El Pajarito, 13).- Madroño, 14).- Aguablanca, 15).- Huanaztacun, 16).- Karatzitzaru.

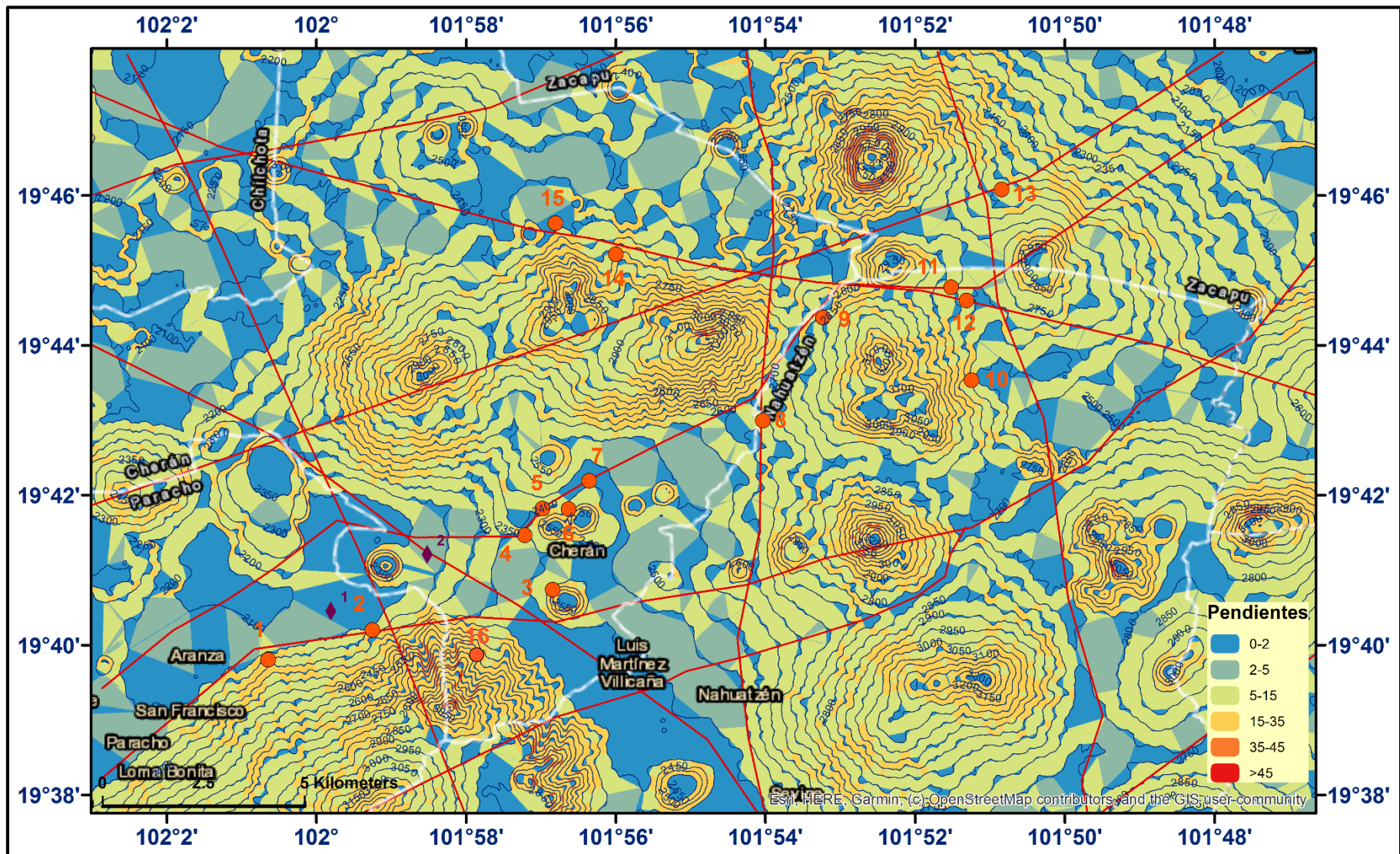


Figura 5.5, plano de pendientes de la Región Cherán, ilustrando las fallas normales en color rojo, límites municipales en blanco, pozos abastecedores en rombo color púrpura, curvas de nivel en línea azul, y manantiales en punto color pardo: 1).- Hueratiro, 2).- El Plan, 3).- Kokunicata, 4).- Guichcarcua, 5).- Uécuaro, 6).- Tendeparacua 7).- Achuniro 8).- La Cofradía, 9).- Zipiatiro, 10).- Minitaro, 11).- El Pajarito 2, 12).- El Pajarito, 13).- Madroño, 14).- Aguablanca, 15).- Huanaztacun, 16).- Karatzitzaru. De acuerdo a: Demek, 1972.

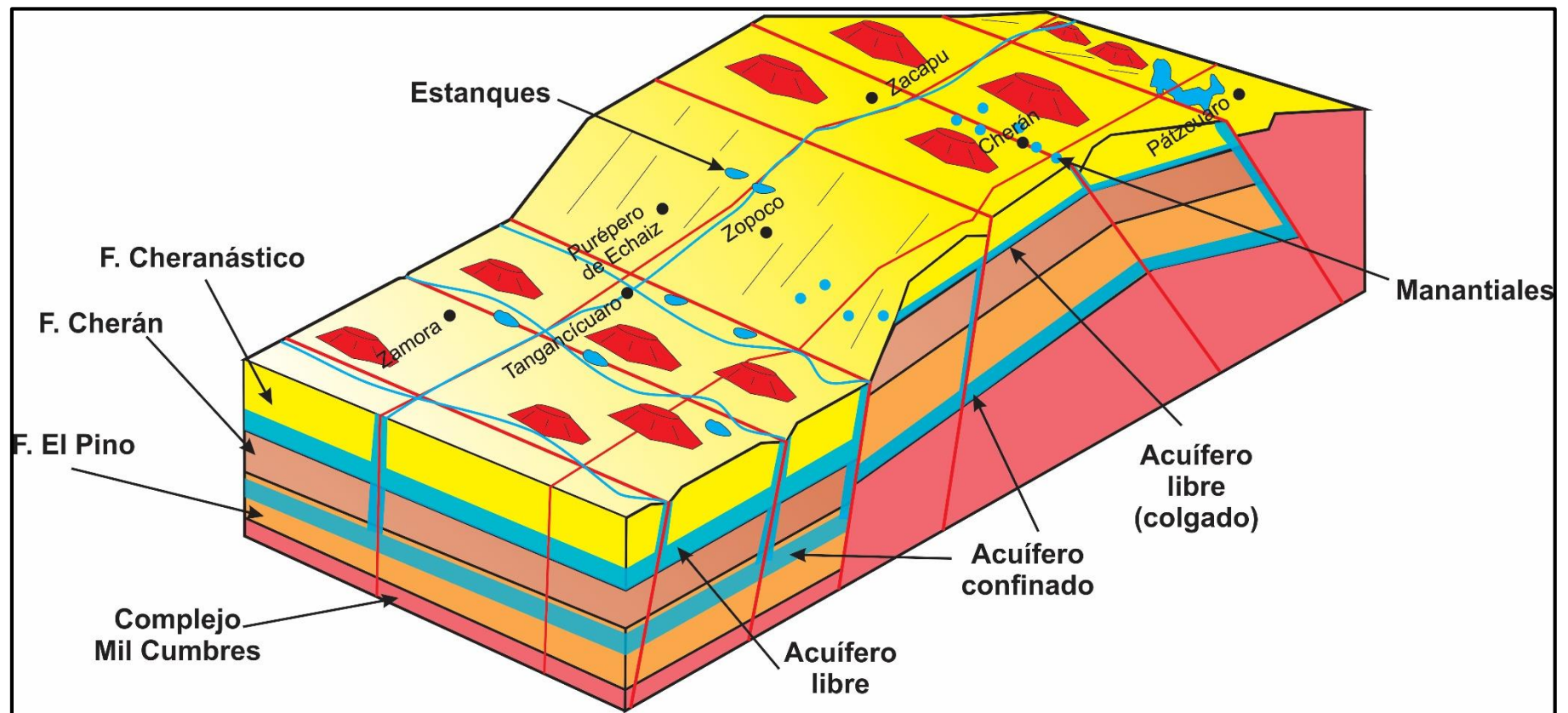


Figura 5.6, modelo geohidrológico tridimensional mostrando el sistema hídrológico de la zona de recarga (Cherán), y la zona de descarga, localizada en las fosas tectónicas de Zamora y Tangancicuaro, así como los distintos acuíferos que la conforman. Los manantiales se representan en punto azul, y las fallas en línea roja.

Por otra parte, las muestras de agua recolectadas en las surgencias de los manantiales de la región Cherán, al ser analizadas en el laboratorio de geohidrología del Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional (CIDIIR), y graficar los valores de aniones y cationes en un diagrama de Stiff, y de Wilcox, muestran una correspondencia al tipo bicarbonatada sódica, característica de ambientes volcánicos, y una calidad excelente para el consumo humano al carecer de residuos orgánicos y contaminantes agrícolas.

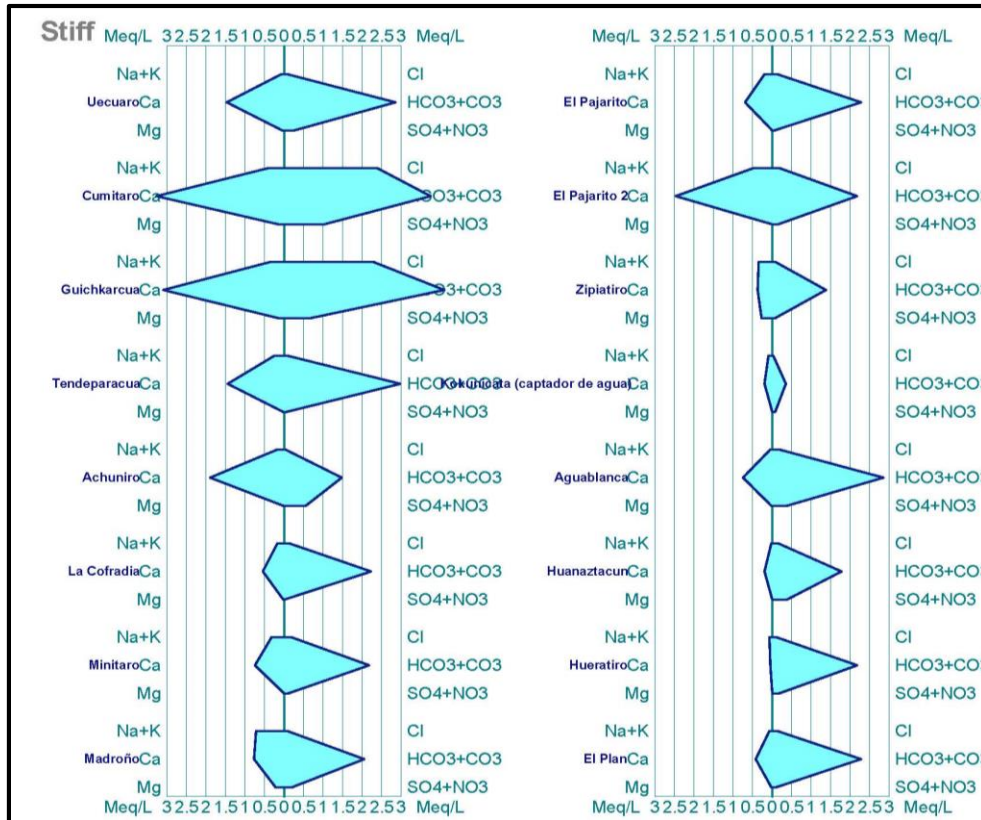


Figura 5.7, diagrama de Stiff mostrando la clasificación de las muestras de agua de los manantiales de la región Cherán.

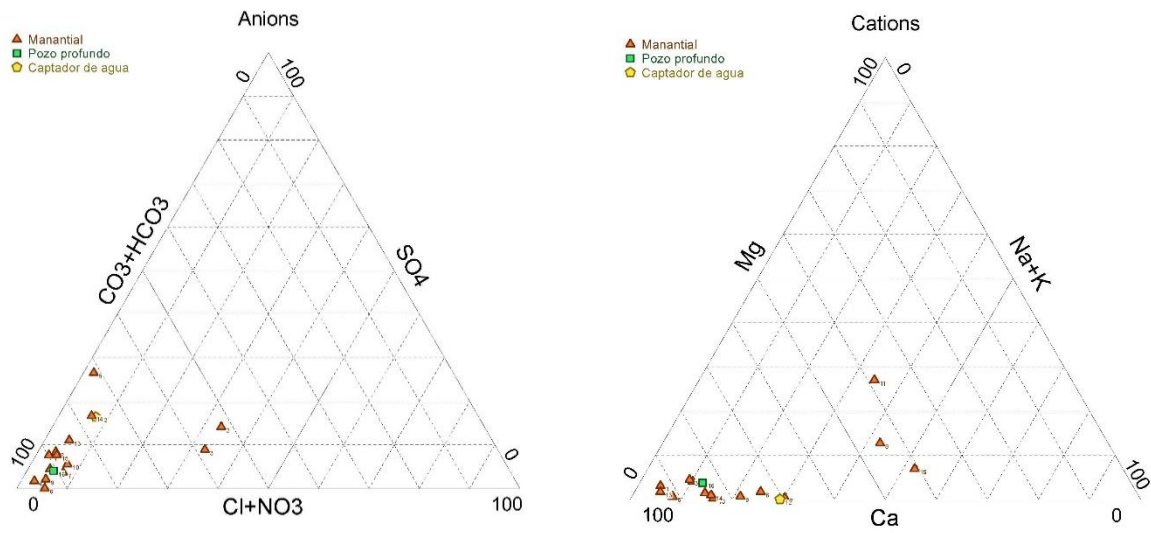


Figura 5.8, diagrama de Wilcox que muestra la clasificación de las muestras de agua de los manantiales de la región Cherán.

6. DISCUSIÓN

MANANTIALES

La zona estudiada se localiza dentro de los límites jurisdiccionales del Acuífero Uruapan que, aunado a sus características geológicas constituidas por una sucesión de derrames, tobas y cenizas andesítico — basáltico emitidas por volcanes escudo pliocuaternarios, y conos monogenéticos Pleistoceno — Holoceno, originan una serie de manantiales en los contactos permeables/impermeables de los volcanes escudo, a través de fallas, juntas de enfriamiento y ductos volcánicos, además, debido a que el suelo se encuentra en proceso de desarrollo, el agua pluvial es infiltrada al subsuelo, evitando escorrentía y embalses superficiales.

En la zona de recarga, los manantiales drenan una serie de acuíferos locales situados en los volcanes en escudo, mientras que, en el Valle de Cherán, drenan acuíferos libres de pequeñas dimensiones enclavados en la Formación Cheranástico en contacto con el miembro cinerítico de la Formación Cherán. Tanto en la zona de recarga como descarga local, los manantiales ocurren a través de la Falla Cherán.

A pesar de que históricamente se ha aprovechado el agua suministrada por los manantiales, llevándola por medio de tuberías hasta las llaves comunales ubicadas en las esquinas del poblado, esta no es suficiente, y el problema se ha incrementado debido a la tala del bosque e incremento demográfico.

ACUÍFEROS

Los acuíferos libres de la Fosa de Cherán, originados de la manera descrita anteriormente, no almacenan agua en cantidades suficientes para abastecer a la comunidad de Cherán debido al arreglo heterogéneo del subsuelo: las formaciones geohidrológicas Cheranástico, Cherán y El Pino confluyen con otras unidades no aflorantes superficialmente constituidas por lapilli, bombas y escorias, y no se encuentran distribuidas uniformemente: los contactos horizontales discontinuos de las unidades almacenadoras e impermeables impiden el flujo continuo de agua subterránea, y esta tiende a acumularse en pequeñas zonas bordeadas por los

unidades impermeables generalmente en los grabens y pasos de las fallas normales, y es transmitida lentamente hacia zonas de menor altitud con una dirección NE — SW.

Por otra parte, de acuerdo a las figuras 5.3 — 5.5, es notable que los volcanes escudo fungen como unidades geohidrológicas individuales, recalcando que al constituirse por derrames basálticos semifracturados, que en ocasiones presentan ductos y cavernas, almacenan y transmiten el agua, originando acuitardos y manantiales de bajo caudal en sus bordes.

POZOS

La perforación de pozos abastecedores de agua en el Valle de Cherán (2,400 msnm) se considera la opción más viable aludido a las fuertes precipitaciones e infiltraciones, pero resulta muy complicado de acuerdo a las particularidades del subsuelo, situación por la que se decidió perforar en la zona más baja de su jurisdicción, situada a una altitud comprendida entre las cotas de 2,150 y 2,250 msnm, esperando encontrar acuíferos de mayores dimensiones y caudales, esto debido a encontrarse en el paso de las fallas Cherán y Aranza, en su cruce con las Falla Nahuatzén, y no afecta los flujos de agua de los manantiales, localizados al NE.

El primer pozo, localizado en El Plan, límite SW con el poblado de Aranza, en las inmediaciones del Volcán San Marcos y del actual Instituto Tecnológico Purépecha, cuenta con una profundidad de 190 m. Sin embargo, pese a que encontró el nivel estático a los 50 m (acuífero libre) y el caudal suministrado fue de 45 lts/s, pruebas de bombeo llevadas a cabo por investigadores del CIIDIR registraron un abatimiento de 45 m en el nivel dinámico en el año 2020, situación por la que el equipo de bombeo presentaba fallas desde años atrás y el aprovisionamiento a los habitantes se redujo considerablemente de 4 a 2 horas diarias por barrio.

Posteriormente, a raíz del conflicto armado, se construyó el segundo pozo en las inmediaciones del Volcán Juanyan en el año de 2016, delimitando el nivel estático a 160 m (acuífero semiconfinado) y dotando 19 lts/s. Sin embargo, ambos pozos se sitúan a 5 y 3 km al SW del poblado, y el agua debe recorrer dicha distancia para

abastecer a la comunidad y, dado a las características heterogéneas del subsuelo que no permite la acumulación de agua en cantidades significables, los acuíferos son muy susceptibles a abatimientos prolongados por los bombeos continuos.

OLLAS CAPTADORAS PLUVIALES

La olla captadora de aguas pluviales del Volcán Kukundicata tiene una capacidad de 20,000 m³, sin embargo, parte de ella es purificada y envasada para consumo humano, y dado a que la temporada de lluvias ocurre de junio a septiembre, no es posible utilizarla todo el año para suministro directo, este se realiza de manera alternada con los pozos, y una parte del agua captada por la olla se usa como reserva en caso de cualquier problemática con ellos en temporada de estiaje.

Por otro lado, las pequeñas ollas situadas cerca de los manantiales generalmente cumplen el objetivo de suministro a una pequeña parte de la población.

OTRAS MANERAS DE RESOLVER LA ESCASEZ

El problema de desabasto no se restringe únicamente al poblado de Cherán, sino a su territorio comunal, y a la Meseta Purépecha en general: tanto los pozos profundos como la olla del Volcán Kukundicata proveen al territorio, pero no satisfacen completamente la necesidad.

Destacando las fuertes precipitaciones pluviales de la región, la inexistencia de cauces y embalses naturales en la superficie, y la mayor cantidad de agua existente en las fosas tectónicas aledañas a la Meseta Purépecha (Presa la Luz, los lagos de Pátzcuaro y Camécuaro, así como los Chorros del Varal); y a las observaciones hechas por el suscrito en el recorrido geológico, el agua pluvial es infiltrada inmediatamente al subsuelo aludido a la gran porosidad de las tobas arenosas que constituyen el suelo, y dirigido hacia el área de descarga mediante juntas de enfriamiento, conductos de los derrames lávicos, y cavernas de colapso, así como a través del sistema de fallas regionales NE — SW, ocasionando escasez en el área de recarga, y abundancia en la descarga.

Sin embargo, pese a la fuerte infiltración, los acuíferos superficiales (libres) presentan dimensiones reducidas debido a los pocos espesores de las unidades

porosas, contactos permeables — impermeables discontinuos, y cambios de pendiente, por lo que la mayor acumulación de agua se encuentra en los acuíferos confinados y semiconfinados interconectados con los anteriores, y que suministran a los estanques y lagos circunvecinos a la Meseta Purépecha.

Ante dichas características, y como ya existe una olla captadora de aguas pluviales con capacidad de 20,000 m³, y que los derrames basálticos fracturados constituyen unas de las mejores litologías almacenadoras de agua subterránea, la opción más viable para solucionar el problema es la construcción de un nuevo pozo profundo.

En la carta hidrogeológica de México (Velázquez — Aguirre; Ordaz — Ayala, 1993), se hace referencia a que los basaltos fracturados y materiales piroclásticos recientes del Eje Neovolcánico funcionan como excelentes acuíferos y áreas de recarga, capaces de almacenar agua y descargarla en los acuíferos profundos de los valles contiguos. Por otra parte, Armas — Vargas (2010), expone que el acuífero profundo de la Fosa de Zamora se encuentra en basaltos fracturados con espesores de hasta 200 m, y su basamento, integrado por andesitas del Mioceno Superior, se sitúa a 300 m de profundidad; además dichos flujos provinieron de la Meseta Purépecha.

Citando a la carta hidrológica de aguas subterráneas de México (INEGI, 2019), el acuífero Morelia — Queréndaro, situado al NE de la Meseta Purépecha, se desarrolla en materiales volcanosedimentarios de grano grueso y fino, sobreyaciendo a basaltos fracturados del Mioceno Superior que en sus inmediaciones constituyen la zona de recarga y, en Cherán, estos se encuentran cubiertos por las secuencias ígneas pliocuaternarias aflorantes. Además, en la zona de descarga del Alto de Aranza (Acuífero Zamora), estos también se encuentran cubiertos.

De esta manera, y tomando como referencia las figuras 6.2 a 6.4 con la finalidad de identificar los sitios de interés geohidrológico para la perforación, son notables los siguientes puntos:

1).- Basculamiento de la Fosa de Cherán.

De acuerdo al trabajo de Rodríguez — Tapia (2020), el perfil topográfico superficial no cambia hasta profundidades considerables en el subsuelo, por lo que el flujo de agua subterránea sigue la tendencia de la topografía y escorrentía superficial.

En el caso de Cherán, el graben homónimo presenta un ligero basculamiento hacia el SE, ocasionando que el agua sea dirigida hacia dicho sector, y en especial a la Fosa de Nahuatzén.

2).- Litología y accidentes estructurales.

En términos geohidrológicos, los basaltos son identificados como excelentes acuíferos, almacenando agua en vesículas, juntas de enfriamiento, fallas, ductos y cavernas de colapso. Por lo tanto, al estar constituida por derrames basálticos, la Región Cherán ofrece posibilidades de acumulación hídrica en los basaltos del Plioceno Inferior interconectados por medio de las fallas en los sectores NE y SE de la Fosa.

3).- Pendientes y escurrimientos

Al recurrir a la imagen 6.2, se observa un mayor desarrollo de cauces temporales en el sector NE y SE de la fosa, por lo que es evidente que la mayor recarga ocurre en los volcanes escudo del límite citado, y la infiltración en sus límites con el valle. Por tanto, la mayor concentración de acuíferos superficiales y profundos se desarrolla ahí, existiendo cantidades mayores de agua que en el sitio donde se perforaron los dos pozos actuales.

De esta manera, el agua de recarga es dirigida inmediatamente al poblado de Villicaña a través de pendientes convexas de 5 a 15° de inclinación, almacenándose en cantidades limitadas en las inclinaciones del valle oscilantes entre 0 y 5°, pero la gran mayoría se encauza y acumula debajo y alrededor de Villicaña al presentar pendientes de 0 a 5°.

4).- Parteaguas.

Siguiendo el flujo de agua subterránea desde su infiltración en los volcanes escudo hasta su descarga en la Fosa de Nahuatzén, en el punto identificado por las

coordenadas geográficas 19°40'50"N y 101°55'15" W, se localiza un volcán escudo con una altura de 2,550 msnm, y que corresponde al de menor altitud de la región, hacia donde claramente arriba el flujo subterráneo en su paso hacia Villicaña que, al constituirse de igual manera por derrames basálticos semifracturados, se desempeña como una unidad geohidrológica individual capaz de almacenar agua en fracturas, ductos, juntas y cavernas; y a la vez transmitirla hacia la Fosa de Nahuatzén en pendientes de 5 a 15°, donde nuevamente se acumula en las zonas de menores altitudes y pendientes.

5).- Profundidad del nivel freático.

Refiriendo el estudio geohidrológico realizado por Manríquez — Espino (2018), el nivel estático estimado en la Fosa de Cherán para los acuíferos mayores se sitúa a 2,250 msnm: dado que Cherán se encuentra a una altitud de 2,400 msnm, habría que perforar 150 m, sin embargo, los pozos actuales drenan los acuíferos de esa altitud en el lado contrario del graben, y no ofrecen suficiente abasto.

Por lo tanto, de acuerdo a los puntos anteriores, es recomendable realizar dos sondeos eléctricos verticales (SEV) en los alrededores de la cima del estratovolcán citado y los límites de Cherán, con la finalidad de localizar los flujos subterráneos de drenado y acumulación del agua: el primero, situado en la Fosa de Nahuatzén y perpendicular a ella, tomando como referencia los puntos 19°39'25" N, 101°56'36" W, y 19°40'13" N, 101°55'48", a una profundidad de 200 m; y el segundo, en las inmediaciones de la cima del volcán referido, cuyos vértices corresponden a 19°41'15" N, 101°55'37" y 19°40'45" N, 101°55'00" W, a 250 m de profundidad.

PRODUCTIVIDAD DE POZOS PROFUNDOS

El incremento gradual de la escasez de agua a nivel mundial ha conllevado a la explotación de acuíferos profundos y megaprofundos desde la década pasada. A continuación, se resumen algunos ejemplos derivados a su rentabilidad:

1).- Xochimilco, Ciudad de México.

La Ciudad de México cuenta con 454 pozos profundos de extracción de agua oscilantes entre 500 y 600 m. Sin embargo, para prevenir más hundimientos y evitar

la sobreexplotación, durante 2017, PEMEX perforó el pozo Santa Catarina 3A en la Alcaldía Xochimilco, con una profundidad total de 2,030 m.

En base a los datos recabados durante las obras, Morales — Casique *et al* (2019), y Santiago — López (2018), mencionan que se localizó el acuífero abastecedor a 2,000 m, y debido a las condiciones del subsuelo, se trata de un acuitardo limitado por cenizas impermeables, cuya agua se clasificó como bicarbonatada sódica, y debido al gradiente geotérmico, presenta una temperatura que oscila los 60°C

Actualmente dicho pozo provee un gasto de 125 lps (10,800 m³/día), beneficiando a 36,000 habitantes. Por otra parte, dado que el promedio de perforación de otros pozos en el país es de 300 m, los pozos abastecedores de agua en la Ciudad de México son considerados como los más profundos del mundo hasta el momento.

2).- Altos del Golán, Israel.

David (2014) y Banks (2015) citan que, en 2010, el gobierno israelí, en conjunto con el Fondo Nacional Judío con sede en Estados Unidos, y JNF USA's Parsons Water Foundation, construyeron Shamir Drills, un complejo de tres pozos de 1,500 m cada uno, extrayendo agua para las actividades agrícolas y acuícolas del norte de Israel debido a las sequías.

El complejo produce 600 m³ por hora, y debido a la profundidad de extracción, las aguas presentan una temperatura de 47° C, y son muy corrosivas debido a sus cantidades de azufre y compuestos cáusticos, por lo que es necesario almacenarla en un depósito al aire libre donde se somete a un proceso de aireación para enfriarla y eliminar dichos compuestos. Sin embargo, la temperatura resulta favorable, pues los agricultores la utilizan para calentar sus árboles esperando alargar el ciclo de crecimiento, y en invierno se utiliza en las granjas acuícolas para mantener la temperatura del agua y producir peces todo el año.

Correlación con Cherán

De acuerdo a los ejemplos anteriores, actualmente se recurre a la perforación de pozos megaprofundos para evitar la sobreexplotación de los acuíferos superiores y sus repercusiones al medio ambiente. Así, los caudales suministrados por dichos

acuíferos son mucho mayores, aunque las aguas presentan termalismo, y en algunas ocasiones como el caso de Israel, considerables concentraciones de azufre u otros elementos presentes en las rocas.

En la Meseta Purépecha aflora una secuencia de basaltos cuyo fracturamiento aumenta con la profundidad, y debido a la interconectividad de los acuíferos, se estima que los gastos sean mayores a partir de los 150 m de profundidad con aguas bicarbonatadas sódicas aludido al ambiente volcánico.

Por otra parte, en la Meseta Purépecha, al Sur de Nahuatzén y Oeste de Sevina, se tiene registro de un pozo productor, situado a 2,363 msnm, con una profundidad de nivel estático de 153 m (2,210 msnm), aludido a que los volcanes escudo descargan en esa zona, situación por lo que la perforación en los límites con Nahuatzén es altamente recomendable.

MARCO JURÍDICO

Por decreto oficial, el 27 de junio de 1975, el Acuífero Uruapan es declarado como de interés público al situarse en la jurisdicción del Bajo Balsas, y se establece como vedado por tiempo indefinido para extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas subterráneas. Por otra parte, el 20 de octubre de 1987, también se declara como de interés público la conservación de mantos acuíferos y el aprovechamiento de las aguas subterráneas del resto del Estado de Michoacán. Por lo tanto, únicamente se permiten extracciones limitadas para uso doméstico, industrial, riego y otros.

Por otra parte, en el párrafo 5º del artículo 27º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se decreta que le pertenecen a la nación todas las aguas superficiales, marinas y del subsuelo. Por lo tanto, y al encontrarse el área de estudio en decreto de veda, para la perforación de un nuevo pozo abastecedor es necesario recurrir al artículo 98 de la Ley de Aguas Nacionales (última reforma publicada el 6 de enero de 2020), donde se establece que, para la perforación de pozos de agua, se requerirá de una asignación en base a los permisos instaurados en los artículos 23 y 42 de la misma, así como en el 20, 21 BIS, 22, 24 y 25 de la

misma. A continuación, se presenta un breve cuadro resumiendo las leyes, normas y reglamentos implicados:

Ley/norma/reglamento	Artículo	Descripción
Ley de Aguas Nacionales	98	Perforación en zonas de veda. Permisos en torno a los artículos 23 y 42.
Ley de Aguas Nacionales	20, 21, 21 BIS, 22, 23, 24, 25, 42	Requisitos para solicitud de concesión y programa de manejo de acuífero y obras de perforación.
Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales	29, 30, 31, 32	Permisos para concesiones y asignaciones.
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	28	Impacto ambiental
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	5	Facultades de la federación
Ley Federal de Derechos	3, 192, 192-A, 192-B, 195-E, 222, 223	Pago de derechos
Ley Federal de Procedimiento Administrativo	3, 15, 15-A	Elementos y requisitos el acto administrativo, disposiciones generales
Norma Oficial Mexicana	NOM-011-CONAGUA-2000	Conservación del recurso agua y especificaciones para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
Norma Oficial Mexicana	NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la perforación de pozos para prevenir la contaminación de acuíferos
Norma Oficial Mexicana	NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.

Norma Oficial Mexicana	NOM-014-SSA1-1993	Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.
Norma Oficial Mexicana	NOM-127-SSA1-1994	Salud Ambiental Agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización
Norma Oficial Mexicana	NOM-006-ENER-1995	Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba.

Figura 6.1, resumen de leyes, normas y reglamentos implicados en la perforación del pozo propuesto.

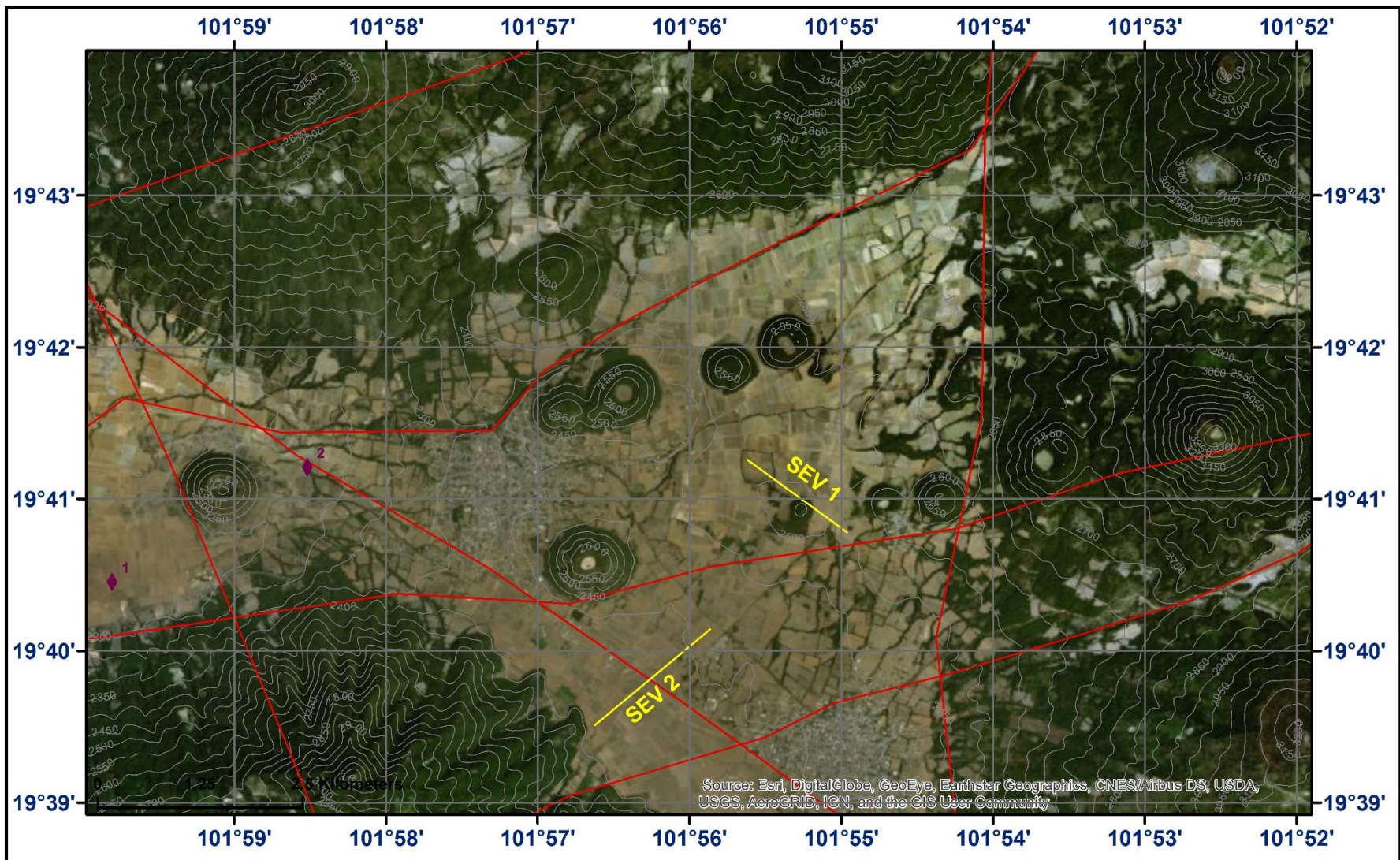


Figura 6.2, imagen satelital mostrando la localización de los pozos abastecedores actuales en rombo púrpura, y los sondeos eléctricos verticales recomendados en línea color rojo en los límites con Nahuatzén. Modificado de: Manríquez — Espino, 2018.

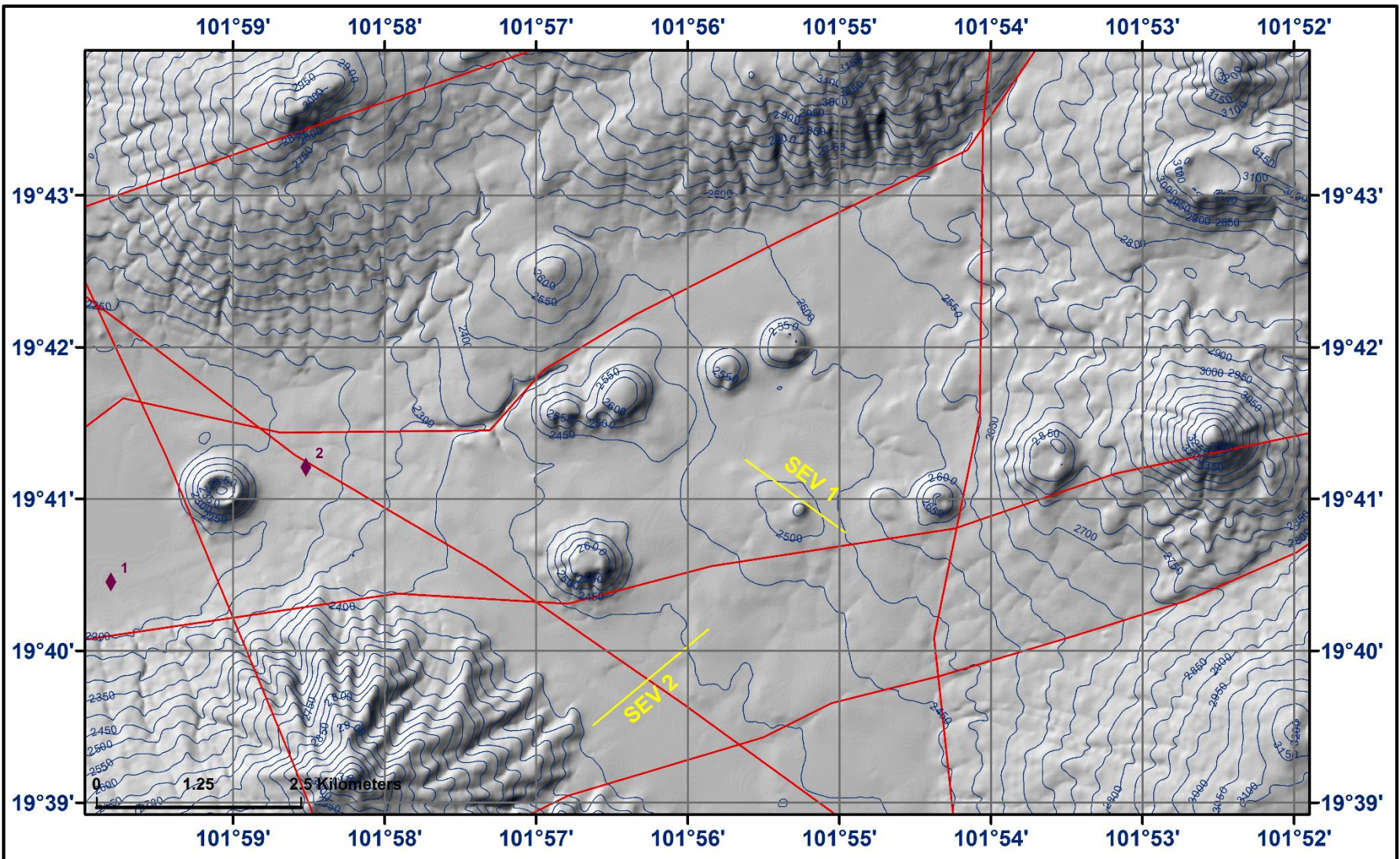


Figura 6.3, plano de sombras ilustrando la localización de los pozos abastecedores actuales en rombo púrpura, y los sondeos eléctricos verticales recomendados en línea color rojo en los límites con Nahuatzén. Modificado de: Manríquez — Espino, 2018.

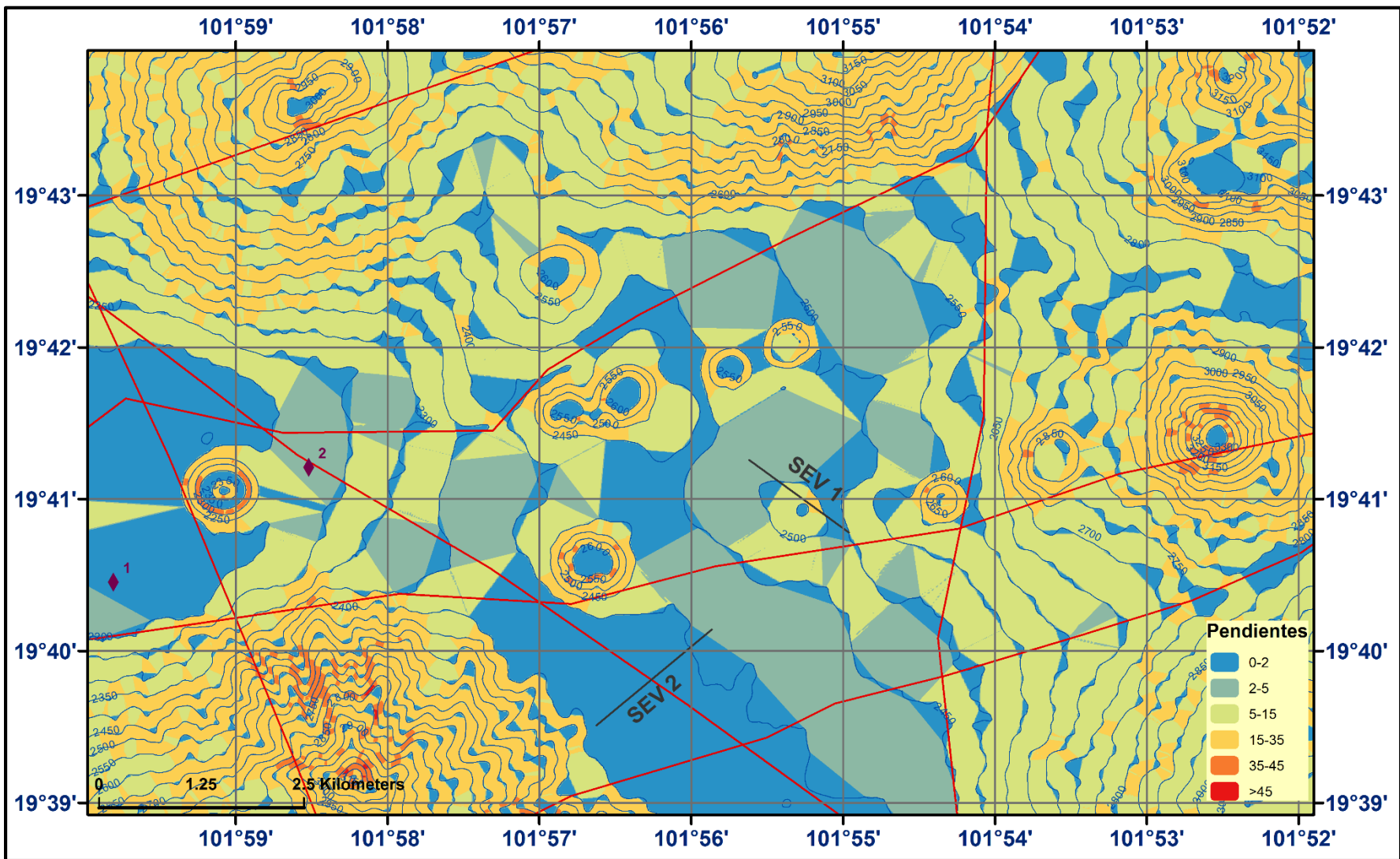


Figura 6.4, plano de pendientes ilustrando la localización de los pozos abastecedores actuales en rombo púrpura, y los sondeos eléctricos verticales recomendados en línea color negro en los límites con Nahuatzén. Modificado de: Manríquez — Espino, 2018; Demek, 1972.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1).- La zona de recarga de los manantiales de la Región Purépecha de Cherán, se caracteriza por situarse en un ambiente volcánico constituido por una secuencia extrusiva de tobas, derrames y ceniza andesítico — basáltico de edad Mioceno — Holoceno, particular del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato, cuyos contactos litológicos permeables/impermeables, situados en los bordes de volcanes escudo, originan una serie de 16 manantiales de bajo caudal y agua dulce en la Fosa Tectónica de Cherán a través del paso una falla normal NE — SW con caída al SE. Estos manantiales se catalogan como gravitacionales, de contacto, y tubulares, perennes, no termales (Bryan, 1919 a y b); drenantes, emergentes y de cuarta a sexta magnitud (Meinzer, 1927 y 1927).

2).- En la zona estudiada, el autor propone de manera informal las siguientes unidades formacionales:

Cheranástico: Integrada por tobas andesíticas arenó — limolíticas, porosas, permeables y deleznales al golpe del martillo, de edad Pleistoceno Medio — Superior, y con un espesor de 30 m.

Cherán: constituida por dos miembros: el primero corresponde a derrames lávicos basálticos que conforma edificios volcánicos en escudo y derrames aislados; cuenta con un espesor de 90 m.

El segundo miembro se encuentra compuesto por depósitos cineríticos basálticos impermeables, así como tobas y lapillis poco consolidados y deleznales al golpe del martillo, con un espesor de 20 m.

Al infrayacer a la Formación Cheranástico, su edad queda asignada en Plioceno Superior — Pleistoceno Inferior.

El Pino: Tobas arenosas y limolíticas andesíticas, porosas y permeables. Al corresponder a la unidad formacional más antigua aflorante en el Valle de Cherán, su edad se designa en Plioceno Medio — Superior, con un espesor de 25 m.

3).- En el área estudiada, se identificó una serie de fallamientos normales NE — SW con caída a los cuadrantes NW Y SE, que originaron una serie de volcanes en escudo del Plioceno Medio — Superior, y que fungen como zona de recarga de los manantiales de Cherán.

A su vez, se reconoció otro sistema de fallas normales orientadas NW — SE y caída al NE, cuya intersección con las anteriores, suscita un graben tectónico de geometría triangular limitado por volcanes escudo denominada informalmente como Fosa de Cherán.

Los fallamientos NE — SW conciernen a los principales del Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato y de la Meseta Tarasca, en cuyos pasos se desarrollan los manantiales regionales, y las cuencas lacustres de: Pátzcuaro, Zacapu, y Zirahuén, así como los estanques del área Zamora — Tangancícuaro — Chilchota.

4).- Las características volcánicas extrusivas del área estudiada, constituidas por derrames basálticos fracturados, materiales volcanosedimentarios andesítico — basáltico, fallamientos y suelos en proceso de formación, ocasionan que el agua pluvial se filtre inmediatamente al subsuelo sin generar escorrentía ni embalses superficiales.

En el subsuelo, los derrames basálticos semifracturados de la Formación Cherán almacenan y transmiten el agua por medio de juntas de enfriamiento, cavernas de colapso, y ductos volcánicos hasta el contacto con su miembro cinerítico, suscitando acuitados locales también catalogados como acuíferos colgados al ser drenados por un conjunto de manantiales en los bordes de volcanes escudo (área de recarga).

En el Valle de Cherán, esta agua subterránea corre a través de la falla homónima por medio de la Formación Cheranástico, hasta su contacto con las cenizas Cherán, y también provoca manantiales en el paso de la falla que drenan acuíferos libres de pequeñas proporciones.

De esta forma, el agua desciende hacia la Fosa Paracho — Nahuatzén y los valles de Tangancícuaro, Chilchota y Zamora.

Dadas las características de la Formación El Pino, esta es susceptible de almacenar y transmitir agua, por lo que también desarrolla acuíferos semiconfinados locales de pequeñas proporciones limitados por el tanto horizontal como verticalmente por el miembro cinerítico de la Formación Cherán mediante los saltos de falla y arreglo heterogéneo del subsuelo.

Por otra parte, y de acuerdo a las características de la región, los acuíferos profundos ocurren en las unidades basálticas y tobáceas del Complejo Mil Cumbres, son catalogados como confinados y semiconfinados, y se interconectan con los establecidos en las formaciones Cheranástico, Cherán y El Pino mediante las fallas normales.

Así, el agua pluvial captada en el Alto de Aranza es transmitida hacia la zona de descarga regional de Zamora — Tangancícuaro, donde los estanques son producidos por manantiales de mayores caudales en el paso de las fallas NE — SW.

5).- Tanto los dos pozos profundos del límite SW del Valle de Cherán, así como la planta de tratamiento de aguas residuales y su captador de aguas pluviales, no generan suficiente abasto a la población. Aunque cuenta con caudales de hasta 45lts/s, el pozo situado en El Plan registra abatimientos de 45 m, y el segundo pozo cuenta con poco caudal (19lts/s); aunque también suministra al poblado, el agua del captador pluvial se usa para consumo humano y en ocasiones como reserva potable ante el fallo de la bomba de los pozos aludido a abatimientos.

Ante esta problemática, se propone la perforación de un nuevo pozo profundo en los límites de Cherán y Nahuatzén, con la finalidad de extraer agua del acuífero confinado desarrollado en el Complejo Mil Cumbres y abastecer a la porción Oeste de los territorios comunales citados, aprovechando el paso de una de las fallas principales de la fosa, y al tener su zona de recarga en los volcanes circundantes. De esta manera, es probable que dicho acuífero se ubique en una caverna o una

serie de cavernas interconectadas de colapso en derrames basálticos tipo AA, y proporcione los caudales necesarios.

RECOMENDACIONES

1).- De acuerdo a las conclusiones del presente estudio, y con la finalidad de solventar el desabasto de agua potable, se recomienda realizar sondeos eléctricos verticales (SEVs) en el área limitada por los puntos: 19°39'25" N, 101°56'36" W, a y 19°40'13" N, 101°55'48", a una profundidad de 200 m; y el segundo 2.5 km al NE del Volcán Kukundicata, cuyos vértices corresponden a 19°41'15" N, 101°55'37" y 19°40'45" N, 101°55'00" W, a 250 m.

Esto con el objetivo de localizar acuíferos profundos de agua bicarbonatada sódica en cavernas y ductos desarrollados en derrames basálticos fracturados del Plioceno Inferior, debido a que estas estructuras son comunes en dicha porción y se sitúan a lo largo de fallamientos normales que no desarrollan manantiales superficiales; o en materiales volcanosedimentarios fracturados porosos y permeables.

2).- En base a los resultados del SEV, realizar un estudio hidrogeológico detallado para determinar las dimensiones de la unidad acuífera, volumen, flujo, caudal, recarga, descarga, geoquímica, porosidad y transmisividad, con la finalidad de establecer su potencial abastecedor al municipio de Cherán.

3).- Revisar el marco jurídico de los pozos actuales, y en base a ello proponer el desarrollo del nuevo pozo.

BIBLIOGRAFÍA

Alaniz — Álvarez, S.; Nieto — Samaniego, A.; Morán — Zenteno, D.; Alba — Aldave, L., *“Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike — slip tectonics in Taxco region, southern Mexico”*. Journal of Volcanology and geothermal research, vol. 118, pp. 1 — 14. 2002.

Allan, J. F., *“Geology of the Colima and Zacoalco grabens, SW Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt”*. Geological Society of America Bulletin, v. 97, pp. 473 — 485. 1986.

Allan, J. F., Nelson, S. A., Luhr, J. F., Carmichael, I. S. E., Wopat, M. and Wallace, P. J., *“Pliocene-recent rifting in SW Mexico and associated volcanism: an exotic terrain in the making”*, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., *“The Gulf and the Peninsular Province of the Californias”*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p. 425 — 445. 1991.

Almaraz — Muñoz, A., *“Prospección geohidrológica en la Meseta Tarasca”*. Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México. 1990.

Argueta, A; Castilleja, A., *“El agua entre los p'urhépecha de Michoacán”*. Cultura y representaciones sociales, vol. 4, no. 5, pp. 64 — 87, 2008.

Armas — Vargas, F., *“Modelación y simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, en Michoacán, México”*. Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 33 — 82. 2010.

Atwater, T., *“Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America”*. Geological Society of America Bulletin, v. 81, p. 3513 — 3536. 1970.

Ávila, P., *“Escasez de agua en la región indígena de Michoacán: el caso de la Meseta Purépecha”*. Colegio de Michoacán. 1996.

Ávila, P., *“La cultura del agua en los pueblos indígenas de la Meseta Purépecha”*. En: Sandre, I., y Murillo, D., *“agua y diversidad cultural en México”*. Programa

Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2008

Bandy, W., "Southwest propagating rifting along the Rivera-Cocos plate boundary and related deformation within western Mexico" [abs]: Eos (Transaction American Geophysical Union), v. 73, p. 508. 1992.

Bandy, W., and Pardo, M., "*Statistical examination of the existence and relative motion of the Jalisco and Southern Mexico Blocks*". Tectonics, v. 13, p. 755 — 768. 1994.

Bandy, W., and Yan C., "*Present — day Rivera-Pacific and Rivera — Cocos relative plate motion*" [abs]: Eos (Transaction American Geophysical Union), v. 70, p. 1342. 1989.

Banks, R., "*Drilling deep for water under the Golan Heights*". Myfarmlife. Recuperado en: myfarmlife.com/asides/drilling-deep-for-water-under-the-golan-heights. 2010.

Barrier, E., Bourgois, J., and Michaud, F., "*Le systeme de rift actifs du point triple de Jalisco: vers un proto-golfe de Jalisco*". Académie des Sciences Comptes Rendus, Paris, v. 310, p. 1513–1520. 1990.

Bönhel, H., Moran-Zenteno, D., Schaaf, P., and Urrutia Fucugauchi, J., "Paleomagnetism and isotope data from southern Mexico and the controversy over the pre — neogene position of Baja California". Geofísica Internacional, v. 31, p. 253 — 261. 1992.

Bourgois, J., and Michaud, F., "*Active fragmentation of the North America plate at the Mexican triple junction area of Manzanillo*". Geo — Marine Letters, v. 11, p. 59 — 65. 1991.

Bryan, K., "*Classification of springs*". United States Geological Survey Staff, published research 493, The Journal of Geology, vol. 27, no. 7, pp. 522 — 561, 1919. in: DigitalCommons@UniversityOfNebraska-Lincoln, 2020.

Calverio, P., *“Repensar y ampliar la democracia. El caso del municipio autónomo de Cherán K’eri”*. SciELO, vol. 27, no. 75. 2014.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *“Ley de Aguas Nacionales”*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992. Última reforma publicada DOF 06-01-2020”. México.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *“Ley Federal de Derechos”*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 1981. Última reforma publicada DOF 08-12-20. México.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *“Ley Federal de Procedimiento Administrativo”*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 04 de agosto de 1994. Última reforma publicada DOF 18-05-2018. México.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *“Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente”*. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Última reforma publicada DOF 09-01-15. México.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, *“Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Nuevo Reglamento publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de enero de 1994. Última reforma publicada DOF 25-08-2014. México.*

Campa, M.; Coney, P., *“Tectono — stratigraphic terranes and mineral resources distribution in Mexico”*. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 20, pp.1040 — 1051. 1983.

Campillo, M.; Singh, S.; Shapiro, N.; Pacheco, J.; Herrmann, R., *“Crustal structure south of the Mexican volcanic belt, based on group velocity dispersion”*. Geofísica Internacional, v. 35, no. 4, p. 361 — 370. 1996.

Campos — Enriquez, J.; Sánchez — Zamora, O., “*Crustal structure across southern Mexico inferred from gravity data*”. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 479 — 489. 2000.

Carrasco — Orellana, D., “*Creando bosque: estrategias, resistencias y usos del bosque en la comunidad de Cherán, Michoacán*”. Tesis de maestría. Universidad Iberoamericana. 2015.

Carrasco — Orellana, D., “*Creando bosque: estrategias, resistencias y usos del bosque en la comunidad de Cherán, Michoacán*”. Tesis de maestría. Universidad Iberoamericana. 2015.

Centeno — García, E., “*The Guerrero composite terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra — subduction zone*”. *Special Papers — Geological Society of America*, vol. 436, no. 279. 2008.

Centeno — García, E.; Ruiz, J.; Coney, P. J.; Patchett, P.; Ortega — Gutiérrez, F., “*Guerrero terrane of Mexico: Its role in the Southern, Cordillera from new geochemical data*”. *Geology*, vol. 21, no. 5, pp. 419 — 422. 1993.

Centeno — García, E.; Ruíz, J.; Coney, P.; Patchet, J.; Ortega — Gutiérrez, F., “*El Complejo metamórfico Tumbiscatio — Arteaga, Michoacán: Una secuencia oceánica marginal acrecionada (resumen)*”. XI Convención Geológica Nacional: México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, A.C., pp. 55-57. 1992

Centeno — García, E; Corona — Chávez, P.; Talavera — Mendoza O.; Iriondo A., “*Geology and tectonic evolution of the western Guerrero terrane: a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, Mexico*”. *Publicación Especial del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, pp. 201 — 226. 2003.

Cerca, M.; Ferrari, L.; López — Martínez, M.; Martiny, B.; Iriondo, A., “*Late Cretaceous shortening and early Tertiary shearing in the central Sierra Madre del Sur, southern Mexico: Insights into the evolution of the Caribbean — North American plate interaction*”. *Tectonics*, vol. 26, no. 3. 2007.

Comisión Nacional del Agua, “CNA -01-004 Concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas, modalidad a) general y modalidad b) con requerimiento de manifestación de impacto ambiental”. Comisión Nacional del Agua. México.

Comisión Norteamericana de Nomenclatura Estratigráfica, “Código Esratigráfico Norteamericano”. Boletín del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, vol. 117, pp. 10 — 14. 2010.

CONAGUA, “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Uruapan (1614), Estado de Michoacán”. CONAGUA, subdirección general técnica, gerencia de aguas subterráneas. Pp. 17 — 26. 2020.

CONAGUA, “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Zamora (1608), Estado de Michoacán”. CONAGUA, subdirección general técnica, gerencia de aguas subterráneas. Pp. 16 — 25. 2020.

Consejo mayor, “Segundo informe de gobierno comunal 2015 — 2018: trabajando en comunidad”. Consejo mayor de Cherán, p. 42. 2016.

Corona — Chávez, P.; Reyes — Salas, M.; Garduño — Monroy, V.; Israde — Alcántara, I.; Cruz, L., Morton — Bermea, O.; Hernández — Álvarez, E., “Asimilación de xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán — Guanajuato: el caso de Arócutin Michoacán, México”. Revista mexicana de ciencias geológicas, vol. 23, no. 2, pp. 233 — 245. 2006.

Corona — Chávez, P.; Salas, M.R., “Asimilación de xenolitos graníticos en el campo volcánico Michoacán — Guanajuato: el caso de Arócutin, Michoacán, México”. Revista mexicana de ciencias geológicas, v. 23, no. 2, 233 — 245. 1991.

Damon, P.; Shafiqullah, M.; Clark, K., “Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis”. Revista del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, vol. 5, no. 2, pp. 223 — 238. 1981.

David, L., “The Shamir Drilling Project”. Keren Keyemeth LeIsrael Jewish National Fund. Diciembre 16 de 2014. Recuperado en: <https://www.kkl-jnf.org/about-kkl-jnf/green-israel-news/dec-14/shamir-drilling-project/>

Davis, W. M., “*The geographical cycle*”. Geographical Journal, vol. XIV, no. 5. 1899.

De la Fuente; M., Aitken, C.; and Mena, M., “*Cartas gravimétricas de la República Mexicana, Carta de anomalía de Bouguer*”: Universidad Nacional Autónoma de México. 1994.

De la Tejera, B.; Santos, A.; Santamaría, H.; Gómez, T.; y Olivares, C., “*El oro verde en Michoacán: ¿un crecimiento sin fronteras? Acercamiento a la problemática y retos del sector aguacatero para el Estado y la sociedad*”. En: Economía y Sociedad, año XVII, no. 27, pp. 20 — 40. 2013.

Demant, A., “*Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*”. Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, v. 2, pp. 172 — 181. 1978.

Demant, A., “*Marco geológico regional de la laguna de Zacapu, Michoacán, México*”. En: Demant A.; Labat J.; Michelet D., “*El Proyecto Michoacán 1983 — 1987*”. Tricart J eds. Medio Ambiente e Introducción a los Trabajos Arqueológicos. CEMCA, México, D.F. Collection Etudes Mésoaméricaines II-11, pp 53 — 72. 1992.

Demant, A., “*Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico*”. Revista mexicana de ciencias geológicas, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, v. 3, p. 39 — 57. 1979.

Demek, J., (ed) “*Manual of detailed geomorphological mapping*”. Czechoslovak Academy of Sciences. Akademia, 344 p. 1972.

DeMets, C., and Stein, S., “*Present-day kinematics of the Rivera Plate and implications for tectonics in southwestern Mexico*”. Journal of Geophysical Research, v. 95, p. 21931 — 21948. 1990.

Elías — Herrera, M.; Ortega — Gutiérrez, F., “*Petrology of high — grade metapelitic xenoliths in an Oligocene rhyodacite plug — Precambrian crust beneath the southern Guerrero Terrain Mexico?* Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 14, no. 1, pp. 101 — 109. 1997.

España — Boqueta, M., *“Proceso de deforestación en el municipio de Cherán, Michoacán, México (2006 — 2012)”*. *Madera y bosques*, vol. 22, no. 1, pp. 141—153. 2016.

Fenby, S., and Gastil, G., *“Geologic-Tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas”*, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., *“The Gulf and the Peninsular Province of the Californias”*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p. 79 — 83. 1991.

Ferrari, L., *“Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block: western Mexico: the Tepic — Zacoalco rift revised”*. Geological Society of America, Special paper 334. 1999.

Ferrari, L., *“Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco Block, western Mexico: the Tepic — Zacoalco rift revised”*. *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 91 — 105. 1994 b.

Ferrari, L., *“Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco block and the opening of the southern Gulf of California”* *Geology*, v. 23, no. 8, p. 751 — 754. 1995.

Ferrari, L., Garduño, V. H., Pasquarè, G. and Tibaldi, A., *“Volcanic and tectonic evolution of Central Mexico: Oligocene to Present”*. *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 91 — 105. 1994 b.

Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Castillo, D. and Romero, F., *“Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of the Jalisco Block”*. *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 139–151. 1994 a.

Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Castillo, D., and Romero, F., *“Tectonic evolution of the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico”* [abs]: *Eos* (Transaction American Geophysical Union), v. 74, no. 43, p. 590 — 591. 1993.

Ferrari, L.; *“Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America”*. Special Papers of the Geological Society of America, vol. 402. 2007.

Flores — Ruiz, J., “Estructura cortical de la Faja Volcánica Transmexicana”. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, Instituto de Geofísica. 1997.

Foshag, W.; González, R., “Birth and development of Paricutin Volcano, Mexico”. U.S. Geological Survey Bulletin, vol. 965 — D: 355 — 489. 1956.

Fries, C., “Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero. Región central meridional de México”. Boletín del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 1960.

García — Pérez, F.; Fucugauchi, J., “Crustal structure of the Arteaga Complex, Michoacan, southern Mexico, from gravity and magnetics”. *Geofísica Internacional*, vol. 36, no. 4. 1997.

García — Quintana, A., “Datación magnética de rocas volcánicas formadas durante el Holoceno: caso de flujos de lava alrededor del lago de Pátzcuaro (campo volcánico Michoacán—Guanajuato)”. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, v. 33, no. 2. 2016.

García — Romero, A., “Caracterización hidrogeológica de un sector del acuífero del Valle de Iguala, Guerrero”. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. 2012.

Garduño — Monriy, V., and Tibaldi, A., “Kinematic evolution of the continental active triple junction of the western Mexican Volcanic Belt”. *Académie des Sciences Comptes Rendus*, v. 312, p. 135 — 142. 1991.

Garduño — Monroy, V.; Israde — Alcántara, I., “Paleosismology of the southwestern Morelia — Acambay fault system, central Mexico”. *Geofísica Internacional*, v. 48, no. 3, pp. 319 — 335. 2009.

Garduño — Monroy, V.; Spinnler, J.; Ceragioli, E., “Geological and structural study of the Chapala Rift, state of Jalisco, Mexico”. *Geofísica Internacional*, v. 32, p. 487 — 499. 1993.

Gembe — Sánchez, M., *“Re-configuraciones de género en un pueblo urbanizado de la meseta purhépecha”*. Tesis de doctorado. Colegio de Michoacán A.C. 2016

GEOPE S.A. *“Propección geológica y geofísica en la zona Tepalcatepec, Los Reyes, Michoacán”*. Contrato Ni GZA-79-9-ED. 1979.

Gómez — Tuena, A.; Orozco — Esquivel, M.; and Ferrari, L., *“Igneous petrogenesis of the Trans — Mexican volcanic belt”*. Geological Society of America Special Papers, vol. 422, pp. 129 — 181. 2007.

Guerrero — Sáustegui, 1997., *“Depositional history and sedimentary petrology of the Huetamo sequence, southwestern Mexico”*. Tesis de grado. University of Texas, El Paso. 1997.

Hasenaka, T., *“Size, distribution and magma output rates for shield volcanoes of the Michoacán — Guanajuato volcanic field, Central Mexico”*. J. Volcanol Geotherm Res, vol. 63, no. 1 — 2, pp. 13 — 31. 1994.

Hasenaka, T., and I.S.E. Carmichel, *“A compilation of localization, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacan — Guanajuato Volcanic Field, central Mexico”*. Geofís. Int. vol 24, no.4, pp. 577 — 607. 1985 b.

Hasenaka, T., and I.S.E. Carmichel, *“The cinder cones of Michoacan — Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate”*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 25, pp. 105 — 124. 1985 a.

Henry, C., *“Late Cenozoic Basin and Range structure in western Mexico adjacent to the Gulf of California”*. Geological Society of America Bulletin, v. 101, p. 1147 — 1156. 1989.

Henry, C., *“Late Cenozoic Basin and Range structure in western Mexico adjacent to the Gulf of California”*. Geological Society of America Bulletin, v. 101, p. 1147 — 1156. 1989.

Henry, C., and Aranda-Gomez, J. J., *“The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico”* Geology, v. 20, p. 701 — 704. 1992.

Humphreys, E. D., and Weldon II, R. J., “Kinematic constraints on the rifting of Baja California”, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds “*The Gulf and the Peninsular Province of the Californias*”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 60, no. 2 pp. 159 — 171. 2008.

INEGI, “*Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017*”. INEGI, pp. 16 — 53. 2017.

INEGI, “*Carta hidrológica aguas subterráneas México. Informe técnico, escala 1:1,000,000 serie II*”. INEGI, p. 20. 2019.

Israde — Alcántara, I., “*Beidelite nontronite clays in Neogene sediments from Cuitzeo — Charo lacustrine basin Michoacan, Mexico. Geological setting and paleoenvironmental implications*”. American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p. 217 — 229. 2008.

Israde — Alcántara, I.; Garduño — Monroy, V., “Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (Central western Michoacan, Mexico)”. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, vol.15, no. 1 — 3, pp. 209 — 227. 1999.

Kshirsagar, P.; Siebe, C., Guilbaud, M.; Salinas, S., “Geological and environmental controls on the change of eruptive style (phreatomagmatic to Strombolian — effusive) of Late Pleistocene El Caracol tuff cone and its comparison with adjacent volcanoes around the Zacapu basin (Michoacán, México)”. *J. Volcanol Geotherm Res*, vol. 318, pp. 114 — 133. 2016.

Kshirsagar, P.; Siebe, C.; Guilbaud, M.; Salinas, S.; Layer, P., “Late Pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): stratigraphy, tectonic setting, and paleo-hydrogeological environment”. *J. Volcanol Geotherm Res*, vol. 304, pp. 214 — 236. 2015.

Lonsdale, P., “*Structural pattern of the pacific floor offshore peninsular California*”, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., “*The Gulf and the Peninsular Province of the Californias*”. American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, p. 87 — 125. 1991.

Luhr, J. F., Nelson, S. A., Allan, J. F., and Carmichael, I. S. E., “Active rifting in Southwestern Mexico: manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump” *Geology*, v. 13, p. 54 — 57. 1985.

Lyle, M., and Ness, G., “The opening of the Southern Gulf of California”, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.R.T., eds., “The Gulf and the Peninsular Province of the Californias” *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 47, p. 403 — 423. 1991.

Mammerickx, J., and K. Klitgord, “Northern East Pacific Rise: from 25 m.y. B.P. to the Present” *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 6751 — 6759. 1982.

Manríquez — Espino, S., “Dinámica del agua subterránea en la Meseta Purépecha, Estado de Michoacán”. Tesis profesional, ESIA Ticomán, IPN. 2018.

Martini, M., “Estratigrafía, deformación y magmatismo de la región comprendida entre Huetamo y Zihuatanejo (Michoacán, Guerrero): implicaciones para la evolución tectónica del sur de México durante el Cretácico y el Terciario Temprano” Tesis doctoral, UNAM, 2008.

Martini, M.; Mori, L.; Solari, L.; Centeno — García, E., “Sandstone provenance of the Arperos Basin (Sierra de Guanajuato, central Mexico): Late Jurassic — Early Cretaceous back — arc spreading as the foundation of the Guerrero terrane”. *The Journal of Geology*, vol. 119, no. 6, pp. 597 — 617. 2011.

Martini, M.; Solari, L.; López — Martínez, M., “Correlating the Arperos Basin from Guanajuato, central Mexico, to Santo Tomas, southern Mexico: Implications for the paleogeography and origin of the Guerrero terrane”. *Geosphere*, vol. 10, no. 6, pp. 1385 — 1401. 2014.

McDowell, F. W., Clabaugh, S. E. “Ignimbrites Of The Sierra Madre Occidental And Their Relation To The Tectonic History Of Western Mexico.” In Ash — Flow Tuffs, *The Geological Survey of America*, pp. 113 — 124, 1979.

McDowell, F., Keizer, R. “*Timing of Mid — Tertiary Volcanism in The Sierra Madre Occidental Between Durango City and Mazatlan, Mexico.*”. Geological Society of America Bulletin, v. 88, pp. 1479 — 1487, 1977.

McDowell, F.; Clabaugh, S.; Chapin, C.; Elston, W., “*Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico*”. Geological Society of America Special Paper, vol. 180, pp. 113 — 124.1979.

Meinzer, O., “*Large springs in the United States*” United States Geological Survey Water — Supply Paper 557, p. 94, 1927.

Meinzer, O., “*Outline of groundwater hydrology, with definitions*” United States Geological Survey Water — Supply Paper 494, p. 69, 1923 a.

Meinzer, O., “*The occurrence of groundwater in the United States*” United States Geological Survey Water — Supply Paper 449, 1923 b.

Molina — Garza, R.; Urrutia — Fucugauchi, J., “Deep crustal structure of central Mexico derived from interpretation of Bouguer gravity anomaly data”. *Journal of Geodynamics*, vol, 17, no. 4, pp.181 — 201. 1993.

Montiel — Escobar, J., “*Carta geológica — minera Ciudad Altamirano E14 — 4. Esc 1: 250,000*”. Servicio Geológico Mexicano. 2000.

Moore, G., Marone, C., Carmichael, I. S. E., and Renne, P., “*Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt*”. Geological Society of America Bulletin, v. 106, p. 383 — 394. 1994.

Mooser, F.; Lugo — Hubp, J.; Pérez — Vega, A.; Zamorano — Orozco, J., “*Geomorfología de la sierra de Santa Catarina, DF, México*”. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 11, no. 1, 43 — 52. 1994.

Mooser, O., “*La fauna “Cedazo” del Pleistoceno de Aguascalientes*”. Universidad Nacional Autónoma de México. Anales del Instituto de Biología, vol. 29, pp. 409 — 452. 1958.

Morales — Casique, E.; Arce — Saldaña, J.; Lezama — Campos, J.; Escolero — Fuentes, O., *“Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la Cuenca de México, a partir de la perforación a 2,000 m del pozo profundo denominado “Santa Catarina 3A”*. Boletín del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, no. 123, 82 p. 2019.

Morán — Zenteno, D., *“Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt”*. Journal of South American Earth Sciences, vol. 12, no. 6, pp. 513 — 535. 1999.

Morán — Zenteno, D.; Alba — Aldave, L.; Martínez — Serrano, R.; Reyes — Salas, M; Corona — Esquivel, R.; Ángeles — García, S., *“Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Tertiary volcanic sequences of the Taxco — Quetzalapa region, southern Mexico”*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 15, pp.167 — 180. 1998.

Nava, A.; Núñez — Cornu, F.; Córdoba, D.; Mena, M.; Ansorge, J.; González, J.; Rodríguez, M.; Banda, E.; Müller, S.; Udias, A.; García — García, M.; Calderón, G., *“Structure of the Middle America trench in Oaxaca, México”*. Tectonophysics, v. 154, p. 241–251, 1988.

Nieto — Obregon, J., Delgado-Argote, L., and Damon, P. E., *“Geochronologic, petrologic and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt”* Geofísica Internacional, v. 24, p. 623 — 663. 1985.

Nieto-Obregon, J., Urrutia Fucugauchi, J., Cabral-Cano, E., and Guzman de la Campa. *“Listric faulting and continental rifting in western Mexico— A paleomagnetic and structural study”* Tectonophysics, v. 208, p. 365–376. 1992.

Nixon, G., *“The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere”*. Geological Society of America Bulletin, v. 93, p. 514 — 523. 1982.

NOM-003-CONAGUA-1996, “*Norma Oficial Mexicana NOM-03-CONAGUA-1996. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*”. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 03 de febrero de 1997. México.

NOM-004-CONAGUA-1996, “*Norma Oficial Mexicana NOM-004-CONAGUA-1996. Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general*”. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 08 de agosto de 1997. México.

NOM-011-CONAGUA-2000, “*Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso de agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*”. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril de 2002. México.

Ortega — Guiérrez, F; Centeno — García, E; Ruiz, J.; Coney, P.; Patchett, P., “*Geology, sandstone petrophacies and geochemistry of the Guerrero Terrain, western Mexico*”. International Circumpacific Terrane Conference, 5th: Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones, vol. 42, pp. 39 — 43. 1991.

Ortega — Gutiérrez, F.; Elías — Herrera, M.; Dávalos — Elizondo, M., “On the nature and role of the lower crust in the volcanic front of the Trans — Mexican Volcanic Belt and its fore — arc region, southern and central Mexico”. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, vol. 25, no. 2, pp. 346 — 364. 2008.

Ortega — Gutiérrez, F.; Martini, B.; Morán — Zenteno, D.; Reyes — Salas, M.; Solé — Viñas, J., “*Petrology and very high temperatura cristal xenoliths in the Puente Negro Intrusion: a sapphire — spinel — bearing Oligocene andesite, Misteco Terrane, southern Mexico*”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 28, no. 3, pp. 593 — 622. 2011.

Ortega — Gutiérrez, F.; Mitre — Salazar, L.; Roldán — Quintana, J.; Aranda — Gómez, J.; Morán — Zenteno, D.; Alaniz — Álvarez, S., Nieto — Samaniego, A., “*Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República*

Mexicana, escala 1:2,000,000". Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales de. 1992.

Ortega — Gutiérrez, F; Elias — Herrera, M.; Gómez — Tuena, A.; Mori, L.; Reyes — Salas, M; Macías — Romo, C; Solari, L., "*Petrology of high — grade crystal xenoliths in the Chacaltzingo Miocene Subvolcanic Field, southern Mexico: buried basement of the Guerrero — Morelos Platform and tectonostratigraphic implications*". International Geology Review, vol. 54, no. 14, pp. 1597 — 1634. 2012.

Ortiz — Aguirre, R., "*Glosario geohidrológico*." Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2015.

Pantoja — Alor, J., "*Estudio geológico de reconocimiento de la Región Huetamo, Estado de Michoacán*." Consejo de recursos minerales, Boletín, v. 50, p. 3 — 33. 1959.

Pantoja — Alor, J., "*Geocronometría del magmatismo Cretácico—Terciario de la Sierra Madre del Sur*" Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Boletín, v. 47, p. 1 — 46. 1983.

Pantoja — Alor, J., "*Geologic features and biostratigraphy of the Cretaceous of southwestern Mexico (Guerrero Terrain)*". In: Alcayde, M., "*Geologic transects across Cordilleran Mexico*". Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico. UNAM, Instituto de Geología, Special Paper, v.1. pp. 229 — 260. 2003.

Pardo, M., and Suarez, G., "Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico seismic and tectonic implications". Journal of Geophysical Research, v. 100, p. 12357 — 12373. 1995.

Pardo, M., and Suarez, G., "*Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico*". Geophysical Research Letters, v. 20, p. 2391 — 2394. 1993.

Quadratin., “*Arrancan 3 obras hídricas en Cherán*”. Quadratin. 27 de agosto de 2017. Recuperado en: quadratin.com.mx/municipios/regiones/arrancan-res-obras-hidricas-en-cheran/

Quintero, O., and Guerrero, J., “*Different tectonic stress regimes at the TepicChapala rift*”. [abs]: Eos (Transaction American Geophysical Union), v. 43, p. 533. 1992.

Quintero, O., Michaud, F., Bourgois, J., and Barrier, E., “*Evolución de la frontera septentrional del bloque Jalisco, Mexico, desde hace 17 Ma*”. Boletín del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. v. 10, p. 111 — 117. 1992.

Raisz, E., “*Landforms of Mexico (mapa en escala 1: 3,000,000)*”. Cambridge, Mass. 1964.

Ramírez — Garza. M., “*Bioestratigrafía de la Formación San Lucas con base en el estudio de ammonites del Barremiano Inferior y la parte más baja del Barremiano Superior, en Huetamo, Michoacán*”. Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México. 2007.

Reyes — Guzmán, N., “*Geología volcánica de la región occidental de la cuenca lacustre de Zacapu, Michoacán y su importancia para la arqueología*”. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. 2017.

Righter, K., and Carmichael, I. S. E., “*Subduction and rift — related volcanism at the western end of the Mexican Volcanic Belt, Nayarit, Mexico*”. [abs]: Eos (Transaction American Geophysical Union), v. 74, no. 43, p. 575. 1993.

Rodríguez — Tapia, O., “*Estudio geohidrológico y diseño de pozo, para la extracción de agua para una granja acuícola en el municipio de Xohitepec, Morelos*”. Inédito, pp. 4 — 40. 2020.

Salinas — Prieto, J.; Monod, O.; Faure, M., “*Ductil deformations of opposite vergence in the Eastern part of the Guerrero Terrane*”. Journal of South American Earth Sciences, vol. 13, pp. 389 — 402. 2000.

Santiago — López, D., *“Análisis de la información geológica, geofísica e hidrogeológica en la evaluación de un acuífero profundo (caso Santa Catarina 3A).”* Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. 2018.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidraulicos., *“Estudio geohidrológico en los valles de Uruapan y Coahuayana, Mich.”*. Ariel Construcciones S.A., contrato no. GZA-80-14 GD. 1980

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidraulicos., *“Estudio geohidrológico en los valles de Uruapan y Coahuayana, Mich.”*. Ariel Construcciones S.A., contrato no. GZA-80-14 GD. 1980.

Sedlock, R.; Ortega — Gutiérrez, F.; Speed, R., *“Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico”*. Geological Society of America, Special Paper, no. 178, 153 p. 1993.

Sheth, H.; Torres — Alvarado, I.; Verma, S., *“What is the “calc-alkaline rock series”?”* International Geology Review, vol. 44, no. 8, pp. 686 — 701. 2002.

Simkin T.; Siebert L.; McClelland L.; Bridge D.; Newhall C.; Latter J., *“Volcanoes of the World”*. Hutchinson Ross, Stroudsburg, PA, p. 232. 1981.

Stiff, H. Jr., *“The interpretation of chemical water analysis by means of patterns”*. J. Petr Technology, v. 3, no. 10, p. 15 — 17. 1951.

Talavera — Mendoza, O., *“Detrital zircon U/Pb geochronology of southern Guerrero and western Mixteca arc successions (southern Mexico): new insights for the tectonic evolution of southwestern North America during the late Mesozoic”*. Geological Society of America Bulletin, vol. 119, no. 9 — 10, pp. 1052 — 1065. 2007.

Talavera — Mendoza, O.; Guerrero — Saustegui, M., *“Geochemistry and isotopic composition of the Guerrero Terrane (western Mexico): implications for the tectono — magmatic evolution of the southwestern North America during Late Mesozoic”*. Journal of South American Earth Sciences, v. 13, pp. 297 — 324.

Urrutia — Fucugauchi, J.; Flores — Ruiz, J., “*Bouguer gravity anomalies and regional crustal structure in central Mexico*”. *International Geology Review*, vol. 38, no. 2, pp. 176 — 194.1996.

Urrutia—Fucugauchi, J., “*Crustal thickness, heat flow, arc magmatism, and tectonics of Mexico — Preliminary report*”. *Geofísica Internacional*, v. 25, no. 4, p. 559 — 573.1986.

Valdés, C.; Mooney, W.; Singh, S.; Meyer, R.; Lomnitz, C.; Luetgert, J.; Helsley, C.; Lewis, B.; Mena, M., “*Crustal structure of Oaxaca, Mexico, from seismic refraction measurements*”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 76, p. 547 —563. 1986.

Velázquez — Aguirre, L.; Ordaz — Ayala, A., “*Provincias hidrogeológicas de México*”. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 52, no. 1, pp.15 — 33. 1993.

Velázquez — Guerrero, V., “*Reconstrucción del territorio comunal: el movimiento étnico autonómico en San Francisco Cherán*”. Tesis de grado. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, p. 111. 2013.

Wilcox, R., “*Petrology of Paricutin volcano Mexico*”. US Government Printing Office, no. 965. 1954.

Williams, H., “*Volcanoes of the Paricutin region*”. *United States Geological Survey Bulletin*, vol. 965B, 165 — 279. 1950.