

Instituto Politécnico Nacional



Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

Unidad Ticomán "Ciencias de la Tierra"

**Caracterización Hidrogeológica de la Región de Actopan, Hidalgo.**

**Presenta:**

Jaime Brandon Gutiérrez Trejo

**Tesis de Licenciatura**

Para Obtener el Título de:

**Ingeniero Geólogo**

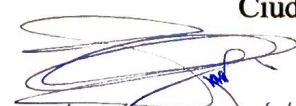
Director Interno de la Tesis, Ing. Saúl Milán Valdés


Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Geología

Director Externo de la Tesis, Dr. Rafael Huizar Álvarez

Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geología

Ciudad de México, 16 de marzo de 2020

  
Ing. Jose Gonzalez Millán 5 NOV 2020.

  
ELIZABETH TAH RAMIREZ

  
Vo Bo. Ing. E. Avila Bocanegra

## Autorización de uso de Obra

### INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir la verdad el que suscribe Jaime Brandon Gutiérrez Trejo manifiesto ser autor de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA REGIÓN DE ACTOPAN, HIDALGO", en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b, de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante "El IPN", autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en Línea) "La Tesis" por un período de (cinco años) contando a partir de la fecha de la presente autorización, dicho período se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a "El IPN" en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concebida afecte o viole los derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, marzo de 2021

Atentamente



---

Jaime Brandon Gutiérrez Trejo



EP Y T/507/2019.

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

**Asunto**

Registro de Tema

CDMX, 02 de septiembre de 2019.

**C. JAIME BRANDON GUTIERREZ TREJO**  
PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE  
INGENIERÍA GEOLÓGICA  
**PRESENTE**

A continuación, comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**"CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA REGIÓN DE ACTOPAN HIDALGO".**

CONTENIDO

- RESUMEN
- ABSTRACT
- INTRODUCCIÓN
- I. GENERALIDADES
- II. MARCO GEOLÓGICO
- III. HIDROLOGÍA
- IV. GEOFÍSICA
- V. HIDROGEOLOGÍA
- VI. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- ANEXOS

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

**Ing. Fernando Rodríguez Chávez**  
Subdirector Académico.

FRCH/gach\*



**UNIDAD TICOMÁN**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**





**Folio**  
EP Y T/017/2021.

**Asunto**  
Aprobación de tesis.

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

CDMX, 2 de marzo de 2021.

**ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ**  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional, por la opción de **TESIS INDIVIDUAL**, con el tema "**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LA REGIÓN DE ACTOPAN, HIDALGO**" presentado por el pasante del Programa Académico de Ingeniería Geológica, **C. JAIME BRANDON GUTIERREZ TREJO**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto, esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

ING. RENÉ ALEJANDRO TÉLLEZ FLORES

TITULARES

ING. JOSÉ GONZÁLEZ MILLÁN

M. en C. LUIS ENRIQUE ÁVILA BOCANEGRA

M. en E. ELIZABETH TAH RAMÍREZ

ING. SAÚL MILÁN VALDÉS







**Folio**

EP Y T/278/2019.

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"  
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"  
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico  
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

**Asunto**

ASESORIA DE TESIS

CDMX, 29 de julio de 2019.

**ING. SAUL MILAN VALDES**

**PRESENTE**

En atención a la Solicitud del C. **JAIME BRANDON GUTIERREZ TREJO**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geológica** con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado, Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, la saludo cordialmente.

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

**Ing. Fernando Rodríguez Chávez**  
Subdirector Académico



**UNIDAD TICOMÁN**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

c.c.p. Ing. René Alejandro Téllez Flores.- Jefe del Departamento de Formación Integral e Institucional.  
Interesado

FRCH/gach\*





**Folio**  
EP Y T/017/2020.

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**  
ASESORÍA DE TESIS

CDMX, 1 de octubre de 2020.

**DR. RAFAEL HUIZAR ÁLVAREZ**

Instituto de Geología  
Técnico Académico Titular B. T. C.  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PRESENTE**

En atención a la solicitud del C. **JAIME BRANDON GUTIÉRREZ TREJO**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geológica** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que, por la opción de **Tesis Individual**, deberá desarrollar el interesado, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema y Contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

"La Técnica al Servicio de la Patria"

**Ing. Fernando Rodríguez Chávez**  
Subdirector Académico



**UNIDAD TICOMÁN**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**

c.c.p. Ing. René Alejandro Téllez Flores.- Jefe del Departamento de Formación Integral e Institucional.  
Interesado

FRCH/gach\*



## *Dedicatorias*

### *A mi familia*

*A mis padres Patricia Trejo y Jaime Gutiérrez que me proporcionaron todo el apoyo y esfuerzo para cumplir una de muchas metas en mi vida.*

*Esta tesis la dedico a mi amada y preciosa hija Charlotte por ser la fuente de motivación para ser mejor cada día.*

### *A mis profesores*

*Se dedica esta tesis por el gran apoyo durante mi carrera profesional y su terminación al Ing. Paul Milán Valdés, Dr. Rafael Huizar Álvarez y René Alejandro Téllez Flores.*

### *Especial a:*

*Dedicatoria especial a la empresa Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo, S.A. de C.V. por brindarme la información requerida para la conclusión de este documento.*

## **Agradecimientos**

Aludo mi gratitud y reconocimiento al Instituto Politécnico Nacional por la gran enseñanza y formación académica, de la ESIA Unidad Ticomán por la excelsa educación.

Agradezco a mi director interno de tesis el Ing. Saúl Milán Valdés por brindarme su asesoría durante la elaboración del presente documento y a mis sinodales que forman parte de la escuela: Ing. René Alejandro Téllez Flores, Ing. José González Millán, M. en C. Luis Enrique Ávila Bocanegra, M. en E. Elizabeth Tah Ramírez.

Agradezco especialmente al Dr. Rafael Huizar Álvarez de la Universidad Nacional Autónoma de México por su asesoría y la enseñanza del tema de la hidrogeología que me permitió concluir de igual manera esta tesis.

Agradezco al Dr. Gustavo Mendoza Romero y el Dr. Jaime Rueda Gaxiola por formarme académicamente y que me permitió también formarme personalmente en el ámbito científico e ingenieril.

Agradezco especialmente a la empresa Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo, S.A. de C.V. que hizo posible esta tesis por brinda la información necesaria geofísica.



## **Resumen**

La falta de información geológica e hidrogeológica localmente conducen hacia problemáticas del uso y gestión de agua subterránea en el municipio de Actopan, Hidalgo, y actualmente es un hecho que causen asuntos negativos con el paso del tiempo, en la economía, industria, medio ambiente y relación con la sociedad, por ello, se caracterizó un estudio local hidrogeológico, que planteó modelos conceptuales 2D y 3D de un sistema único de flujo de agua en el subsuelo, contribuyendo información importante acerca de la clasificación de flujo de agua subterránea a partir de la relación con factores de variación baja que permitieron una descripción propicia de los modelos. Se realizó una serie metodológica en la materia de la cartografía digital y modelamiento tridimensional, generalizando la información y obteniendo las magnitudes deseadas en el recurso hídrico, lo que expresó que el agua es un líquido con la capacidad de moverse a través de cualquier formación rocosa, sea hasta una roca de material muy fino, como las lutitas, y hasta abrirse paso en ellas, desplazarse en forma de flujo de un punto alto hacia uno bajo en el relieve terrestre, y dependiendo de la localización geográfica variará su composición salina, entre otra cadena de factores en relación con esta. Así que, es muy importante tomar las consideraciones apropiadas en el presente estudio, si se llegase a efectuar alguna de las aplicaciones en la rama de la hidrogeología para la extracción y uso del agua subterránea o captación de agua superficial, y sirve como una base de datos para cualquier análisis o estudio de agua.

## ***Abstract***

*Lack of geological and hydrogeological information locally leads to problems of the use and management of groundwater in the municipality of Actopan, Hidalgo, and is currently a fact that cause negative issues over time, in the economic, industry, environment, and relationship with society, therefore, a local hydrological study was characterized which raised 2D and 3D conceptual models of a single water flow system in the subsurface, contributing important information about the flow classification of groundwater from the relationship with low variation factors which allowed a propitious description of the models. A methodological series was made in the field of digital mapping and three-dimensional modelling, generalizing the information and obtaining the desired magnitudes in the water resource, which expressed that water is a liquid with the ability to move through of any rock formation, either to a rock of very fine material, such as shales, and until it makes its way into it, moving in the form of a flow from a high point to a low point in the earthly relief, and depending on the geographical location will vary its composition saline, among other factors in relation to it. So, it is very important to take appropriate considerations in this study, if any of the applications in the branch of hydrogeology were to be made for the extraction and use of groundwater or catchment of surface water and serves as a basis for data for any water analysis or study.*



## Introducción

La presente investigación refiere al tema de la hidrogeología. Aquí se formula el concepto como: “la ciencia derivada de la geología, que se encarga del estudio total del agua subterránea, origen, formación, distribución, evolución, características fisicoquímicas y biológicas, la relación con el hombre y el medio ambiente” (SGM, 2016; Hispagua, 2019). Se inquiera una fase descriptiva con fines cualitativos y cuantitativos para la identificación del sistema acuífero, sus componentes y acontecimientos.

La característica principal de este estudio es adquirir una representación hidrogeológica a nivel local, que concierne problemáticas a nivel regional, para analizarlas es necesario mencionar sus causas. Una de ellas es la escasa parcialidad de los servicios públicos en la disponibilidad del agua potable en el municipio de Actopan, Hidalgo, ya que en algunas localidades carecen de agua entubada y sus drenajes se encuentran conectados a algún río o canal (GOB HG, 2002). Asimismo existe un programa para desarrollo urbano (GOB HG, 2006); sin embargo, no hay suficiente correlación para la planificación hídrica, por lo que, actualmente hay conflictos que refieren a la escasez de agua (Cardón, 2019). Además de los inconvenientes para el abastecimiento en zonas de irrigación y urbana, como consecuencia, puede llegar a ser un riesgo en la economía agropecuaria, al desempleo y en la falta del consumo de agua en la sociedad.

La investigación de esta problemática se realizó por interés académico, debido a una visita de prácticas escolares en la localidad de Tianguistengo, San Jerónimo y zonas aledañas, en la que se percató el desperdicio de agua que salía de la tierra por la construcción de caminos y pasos, también se observó la magnitud de las zonas de cultivos que incrementarán su territorio con el paso del tiempo, en secuela, se necesitará más agua para la irrigación.



De esta manera, se interesa plantear modelos conceptuales 2D y 3D de la distribución del flujo de agua subterránea, y así localizar el mayor movimiento y volumen del recurso, para aportar información geológica e hidrológica y definir una nueva clasificación para una “microcuenca hidrogeológica”, ya que el agua subterránea no se delimita por la forma de una cuenca, sino por una relación de amplios procesos mencionados en la presente tesis, posteriormente, se pretende que se tome en consideración para un proyecto a nivel municipal en la planificación del manejo y el control del agua subterránea.

El capítulo I refiere a las generalidades de la temática, esta menciona desde los objetivos hasta la metodología empleada en la investigación, y se proporciona información agrupada de las características del municipio de Actopan, así como los estudios previos relacionados a esta y los conceptos esenciales para la tesis.

El capítulo II, trata del marco geológico, expresa el léxico desde su estratigrafía hasta la geología estructural, y se conforma de dos apartados; la parte regional de Hidalgo de acuerdo con la carta geológico-minera F14-11 por SGM (1997) y la local de la región de Actopan.

En el capítulo III se menciona la hidrología, caracterizando la primera parte en el agua superficial del área de estudio que contiene una descripción cualitativa y cuantitativa.

El capítulo IV, se presenta la aplicación de la geofísica para poder obtener información acerca de las estructuras en el subsuelo, añadiendo la relación litológica e hidrológica.

El capítulo V trata de la hidrogeología, que explica el sistema de agua subterránea, cómo se distribuye a modo de flujo y actúa como agente geológico en relación con el intemperismo de las rocas.

Finalmente, en el capítulo VI se tiene la caracterización hidrogeológica, describiendo la interrelación con los temas vistos y se presentan los modelos conceptuales hidrogeológicos.





## Índice

<b>Capítulo I. Generalidades .....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. Planteamiento del problema .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Objetivos .....</b>	<b>5</b>
I.2.1. General. ....	5
I.2.2. Específicos.....	6
<b>I.3. Hipótesis .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4. Justificación.....</b>	<b>7</b>
<b>I.5. Metodología .....</b>	<b>9</b>
<b>I.6. Características principales del municipio de Actopan.....</b>	<b>17</b>
I.6.1. Nomenclatura. ....	17
I.6.2. Reseña histórica.....	17
I.6.3. Localización del área de estudio.....	18
I.6.4. Provincias fisiográficas.....	20
I.6.5. Orografía. ....	21
I.6.6. Hidrografía. ....	21
I.6.7. Clima. ....	23
I.6.8. Flora. ....	28
I.6.9. Fauna. ....	29
I.6.10. Edafología. ....	29
<b>I.7. Antecedentes.....</b>	<b>31</b>
<b>I.8. Conceptos esenciales .....</b>	<b>35</b>



## Índice

ii

I.8.1.	Hidrogeología.....	35
I.8.2.	El agua.....	37
I.8.2.1.	Origen del agua.....	37
I.8.2.2.	Propiedades del agua. ....	39
I.8.2.3.	El ciclo del agua. ....	39
I.8.2.4.	Zonas de agua en el subsuelo.....	42
I.8.3.	Porosidad.....	43
I.8.3.5.	Clasificación de la porosidad.....	44
I.8.1.	La ley de Darcy. ....	46
I.8.2.	Conductividad hidráulica.....	47
I.8.3.	Cabezal hidráulico.....	48
I.8.4.	Flujo de agua subterránea.....	49
I.8.4.6.	El intemperismo y la migración de las sales solubles en el agua.....	49
I.8.4.7.	Capacidad de migración de las sales solubles.....	52
I.8.4.8.	Relación del flujo de agua subterránea con el medio geológico.....	53
I.8.5.	Sistema acuífero.....	55
I.8.5.9.	La hidráulica y el sistema acuífero.....	56
I.8.6.	Transmisividad.....	57
I.8.7.	Volumen de agua en movimiento.....	57
I.8.8.	Estudio hidrogeológico.....	58
I.8.8.10.	Modelo conceptual hidrogeológico.....	59
I.8.8.11.	Planificación del agua subterránea.....	60
<b>Capítulo II. Marco geológico.....</b>		<b>63</b>
<b>II.1. Geología regional.....</b>		<b>64</b>
II.1.1.	Estratigrafía.....	65



---

II.1.1.12. Proterozoico.....	68
II.1.1.13. Paleozoico.....	71
II.1.1.14. Mesozoico.....	72
II.1.1.15. Cretácico.....	78
II.1.1.16. Cenozoico.....	79
<b>II.2. Geología local .....</b>	<b>80</b>
II.2.1. Estratigrafía local.....	80
II.2.1.1. Cretácico.....	84
II.2.1.2. Cenozoico.....	88
II.2.2. Geología estructural.....	103
<b>Capítulo III. Hidrología .....</b>	<b>106</b>
<b>III.1. Cuencas hidrográficas .....</b>	<b>107</b>
<b>III.2. Parámetros morfométricos de las unidades hidrográficas.....</b>	<b>108</b>
III.2.1. Parámetros generales (véase resultados Tabla III-3).....	108
III.2.2. Parámetros del relieve (véase resultados en la Tabla III-6).....	112
III.2.3. Parámetros de drenaje (véase los resultados en la Tabla III-7). .....	118
<b>III.3. Precipitación.....</b>	<b>122</b>
<b>III.4. Evapotranspiración .....</b>	<b>125</b>
<b>III.5. Escurrimiento o escorrentía.....</b>	<b>127</b>
III.5.1. Coeficiente de escorrentía. ....	128
<b>III.6. Infiltración.....</b>	<b>130</b>
<b>III.7. Balance hidrológico .....</b>	<b>133</b>



---

---

<b>Capítulo IV. Geofísica.....</b>	<b>136</b>
IV.1. Resistividad.....	137
IV.2. Método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo.....	138
IV.3. Localización de los TEM.....	139
IV.4. Interpretación de los registros transitorios electromagnéticos.....	141
<b>Capítulo V. Hidrogeología.....</b>	<b>148</b>
V.1. Clasificación del flujo de agua subterránea.....	149
V.1.1.3. Flujo regional.....	150
V.1.1.4. Flujo local.....	154
V.2. Formación de la cuenca en relación con el flujo de agua subterránea.....	157
<b>Capítulo VI. Caracterización hidrogeológica.....</b>	<b>162</b>
VI.1. Relación de la zona de recarga con el riego de agua residual urbana.....	163
VI.2. Modelos conceptuales.....	165
<b>Conclusiones.....</b>	<b>173</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>174</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>175</b>
<b>Bibliografía recomendada.....</b>	<b>187</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>188</b>





## Índice de figuras

<i>Figura I-1. Localización del área de estudio, Actopan, Hidalgo .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura I-2. Representación de la división fisiográfica del municipio de Actopan .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura I-3. Modelo digital de elevación (MDE) representado el relieve en el área municipal de Actopan, denotando sus localidades.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura I-4. Mapa hidrológico de Actopan. Representando la división de las subcuencas hidrológicas y sus corrientes .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura I-5. Mapa climatológico de Actopan .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura I-6. Mapa edafológico .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura I-7. Esquema de la distribución del agua en la Tierra .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura I-8. Diagrama del ciclo del agua.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura I-9. Representación de la localización de los antiguos lagos congelados de la Antártida.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura I-10. Zonas hidrogeológicas y tipos de agua en el subsuelo .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura I-11. Representación esquemática del permeámetro de cabezal constante utilizado para determinar la conductividad hidráulica de los sedimentos no consolidados .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura I-12. Presentación esquemática de los elementos clave para determinar el cabezal y el gradiente hidráulicos en un acuífero no confinado [acuífero con rocas de muy baja permeabilidad].....</i>	<i>49</i>
<i>Figura I-13. Representación esquemática del flujo de agua subterránea en la precipitación del ciclo del agua.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura I-14. Diagrama mostrando la relación del agua subterránea con la precipitación, condiciones de drenaje y el intemperismo .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura I-15. Efectos y manifestaciones del flujo impulsado por la gravedad en una cuenca de drenaje regionalmente no confinada .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura II-1. Mapa geológico regional, generalizando las unidades litológicas presentes en la carta geológico-minera de Pachuca, Hidalgo .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura II-2. Columna geológica del eratem a Mesozoico y Cenozoico de Pachuca, Hidalgo.....</i>	<i>69</i>



<i>Figura II-3. Columna geológica del eratem Meso-Neoproterozoico, Paleozoico y Mesozoico de Pachuca, Hidalgo</i>	70
<i>Figura II-4. Columna estratigráfica local de los eratemas Mesozoico y Cenozoico.</i>	81
<i>Figura II-5. Mapa geológico local.</i>	82
<i>Figura II-6. Mapa estructural</i>	104
<i>Figura III-1. Representación de las microcuencas, sectores y unidades del área de estudio.</i>	109
<i>Figura III-2. Descripción de curva, modificada (Strahler 1954a, 353; citado en Strahler, 1957; Sellers, Buján, Corbelle y Miranda, 2017). Tipos de relieve; A) joven asociado a erosivo; B) maduro asociado a equilibrado; y C) viejo asociado a sedimentación.</i>	114
<i>Figura III-3. Curvas hipsométricas e histogramas de las unidades hidrográficas</i>	115
<i>Figura III-4. Histogramas e hietogramas de las unidades hidrográficas</i>	124
<i>Figura III-5. Ciclo del escurrimiento en base a una cuenca</i>	127
<i>Figura III-6. Representación del coeficiente de escorrentía en las unidades hidrográficas del área de estudio.</i>	130
<i>Figura III-7. Gráficas de los balances hidrológicos de las unidades hidrográficas.</i>	135
<i>Figura IV-1. Ejemplo de un TEM</i>	138
<i>Figura IV-2. Localización de los TEM</i>	139
<i>Figura IV-3. Interpretación geológica propia de TEM Fray Francisco</i>	141
<i>Figura IV-4. Interpretación geológica propia de TEM Mesa I y II</i>	142
<i>Figura IV-5. Interpretación geológica propia de TEM El Meje III).</i>	143
<i>Figura IV-6. Interpretación geológica propia de TEM El Meje II</i>	144
<i>Figura IV-7. Interpretación geológica propia de TEM El Meje I</i>	145
<i>Figura IV-8. Interpretación geológica propia de sección geoelectrica.</i>	146
<i>Figura IV-9. Interpretación geológica propia de sección geoelectrica.</i>	147
<i>Figura V-1. Representación de un flujo de agua subterránea regional mostrando los diferentes factores que lo afectan.</i>	151



*Figura V-2. Representación de un flujo de agua subterránea local mostrando los diversos factores que lo afectan* .....154

*Figura V-3. Balance estratigráfico de la Fm. Tarango representado en una columna relacionando la edad, de Ejido Sta. Teresa, Actopan, Hidalgo, México* .....159

*Figura VI-1. Representación de la altitud en el área de estudio en Actopan, Hidalgo* .....163

*Figura VI-2. Modelo conceptual hidrogeológico A-1.* .....166

*Figura VI-3. Modelo conceptual hidrogeológico I-2 y 2-A'* .....167

*Figura VI-4. Modelo conceptual hidrogeológico B-B'-I* .....168

*Figura VI-5. Modelo conceptual hidrogeológico I-B''-B'''* .....169

*Figura VI-6. Imagen renderizada del modelo 3D del relieve terrestre, en la porción centro de Actopan, Hidalgo.*170

*Figura VI-7. Imagen renderizada de corte de modelo conceptual hidrogeológico 3D.* .....171

**Índice de tablas**

*Tabla I-1. Representación del incremento demográfico de Actopan y estimado*.....3

*Tabla I-2. Representación del uso del agua urbana por m<sup>3</sup>/d en relación con la demografía de Actopan* .....4

*Tabla I-3. Representación gráfica del clima en Actopan* .....23

*Tabla I-4. Parámetros de temperatura y precipitación promedio anual de Actopan, Hidalgo* .....28

*Tabla I-5. Descripción edafológica de Actopan. Elaborada a partir del mapa edafológico* .....30

*Tabla I-6. Ciclos y tipos de productos en el intemperismo*.....51

*Tabla I-7. Composición de solutos sólidos del agua de mar, cada uno expresado como porcentaje total* .....51

*Tabla I-8. Composición promedio de rocas ígneas y minerales residuales de agua oceánica y de río)* .....53

*Tabla I-9. Planificación del abastecimiento de agua* .....61

*Tabla II-1. Características del Gneis Huiznopala*.....68

*Tabla II-2. Características de la Formación Guacamaya*.....71

*Tabla II-3. Características de la Formación Huizachal*.....72

*Tabla II-4. Características de la Formación Huayacocotla*.....73

*Tabla II-5. Características de la Formación Cahuasas* .....74



<i>Tabla II-6. Características de la Formación Las Trancas .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla II-7. Características de la Formación Pimienta.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla II-8. Características de las formaciones Tamán, Chipoco y Santiago.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla III-1. Índice de compacidad .....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla III-2. Relación forma Horton .....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla III-3. Resultados de los parámetros generales de las cuencas en el área de estudio.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla III-4. Clasificación de la pendiente media .....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla III-5. Magnitudes de elevación-área de las unidades hidrográficas.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla III-6. Resultados de los parámetros del relieve de las unidades hidrográficas .....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla III-7. Resultados de los parámetros de drenaje.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla III-8. Magnitudes de los drenes en las unidades hidrográficas .....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla III-9. Resultados de la precipitación y temperatura media anual en las unidades hidrográficas del área de estudio. ....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla III-10. Resultados de la evapotranspiración (mm) de las unidades hidrográficas.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla III-11. Resultados del coeficiente de escorrentía y caudal de las unidades hidrográficas .....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla III-12. Resultados de infiltración de las unidades hidrográficas .....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla IV-1. Resistividad de varios tipos de rocas y sedimentos .....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla IV-2. Resistividad del agua .....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla V-1. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel regional del Estado de Hidalgo .....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla V-2. Relación regional con el flujo de agua subterránea en el Estado de Hidalgo .....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla V-3. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel local en una secuencia vertical de la migración de sales solubles contra la profundidad, dentro del área de estudio en la región de Actopan, Hidalgo .....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla VI-1. Concentraciones de coliformes totales y fecales en los sedimentos subsuperficiales desde varias profundidades en Tula y Actopan, Valle del Mezquital.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla VI-2. Concentraciones de coliformes totales y fecales en el agua subterránea de las perforaciones dentro del área de riego de agua residual en el Valle del Mezquital para cada perforación .....</i>	<i>165</i>





<i>Tabla A-0-1. Valores de Ka.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla A-0-2. Coeficiente de escorrentía.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla A-0-3. Clasificación y nomenclatura de depósitos piroclásticos .....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla A-0-4. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel regional con sus diferentes fases, en relación con su salinidad de agua lacustre y oceánica .....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla A-0-5. Relación de las fases de agua subterránea con los parámetros principales en su clasificación de la región de Hidalgo, México .....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla A-0-6. Clasificación del flujo de agua subterránea local en una secuencia vertical .....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla A-0-7. Rango de conductividad hidráulica en varios sedimentos .....</i>	<i>191</i>



## Capítulo I. Generalidades

En este capítulo se logra el planteamiento del presente estudio, objetivo, así como la metodología utilizada, las descripciones generales del municipio de Actopan, Hidalgo y la localización del área de estudio. Se presenta la recopilación de información desde una pequeña nomenclatura, historia, la fisiografía que lo conforma, la constitución de su hidrografía, así como mapas con escala 1: 200,000 desde su orografía hasta la edafología, además de los estudios previos realizados en el área de estudio como en sus cercanías, y los conceptos fundamentales de la temática que son de suma importancia para comprender este documento. En esta parte se entiende mejor las características principales que se tomaron en cuenta para la presente investigación.



## I.1. Planteamiento del problema

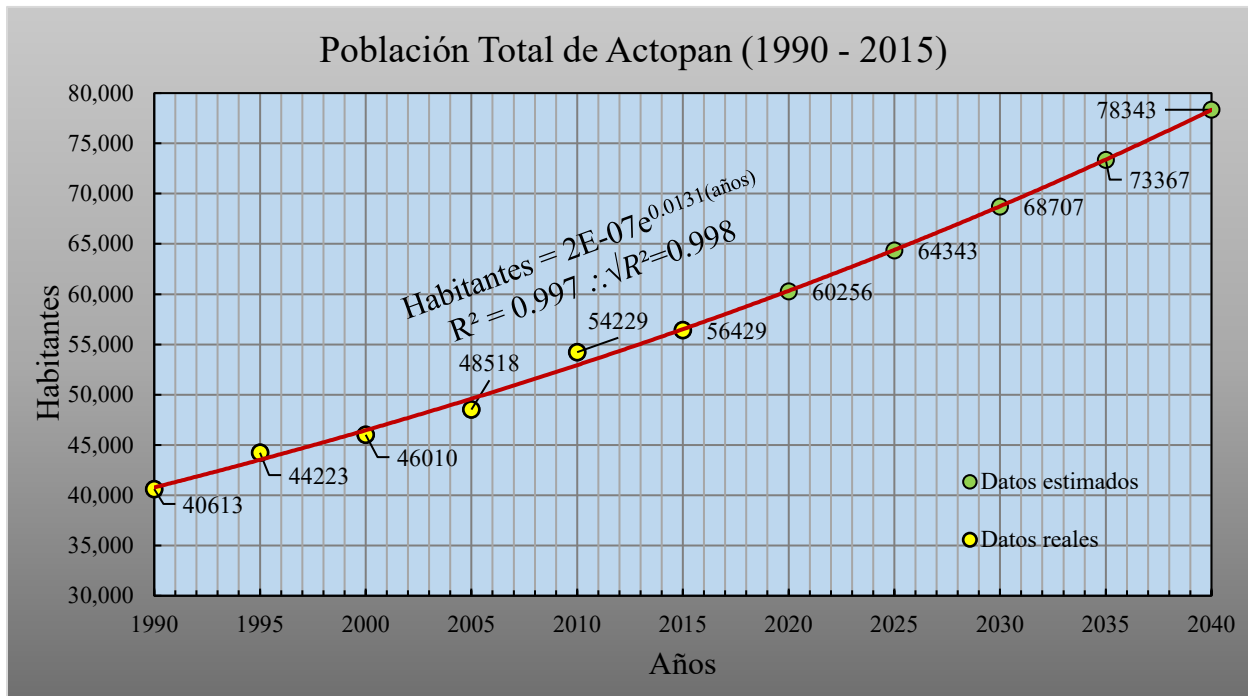
La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015) indica que el municipio de Actopan se encuentra dentro de un sistema acuífero (Actopan – Santiago de Anaya, clave 1313) perteneciente a la jurisdicción territorial de la dirección local en Hidalgo. Sólo una porción muy pequeña de su extremo sur y suroriental se encuentra parcialmente vedada (terreno cerrado por ley u ordenanza). La superficie no vedada del acuífero está sujeta a las disposiciones: “Acuerdo general por el que, se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, en el cual, no se permite la perforación de pozos, construcción de obras o infraestructuras o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción del agua nacional del subsuelo, sin contar con la concesión o asignación otorgada por CONAGUA.

Como se sabe el municipio de Actopan, se ubica al norte de la Ciudad de México. La población total ha incrementado desde 1990 al 2015 (véase Tabla I-1) hacia unos 15,816 habitantes llegando a 56,429 según el Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM, s.f.).

Para el 2025 se estima una población de 64,343 habitantes, en la Tabla I-2 se presenta la relación que existe entre el consumo de metros cúbicos de agua por día de los habitantes con el municipio (en sus respectivos años), en resultado, se gastarán 12,869 m<sup>3</sup>/d de agua urbana y se estima que se consumirán 4,398,615 de m<sup>3</sup> de agua.

Sin embargo, aun cuando no se sobreexplota, las zonas urbanas necesitan más recurso debido al problema del impacto negativo del sustento de agua en México, es decir, las ciudades cercanas (la Cuenca o Valle de México) que lo requieran se suministrarán de este acuífero.

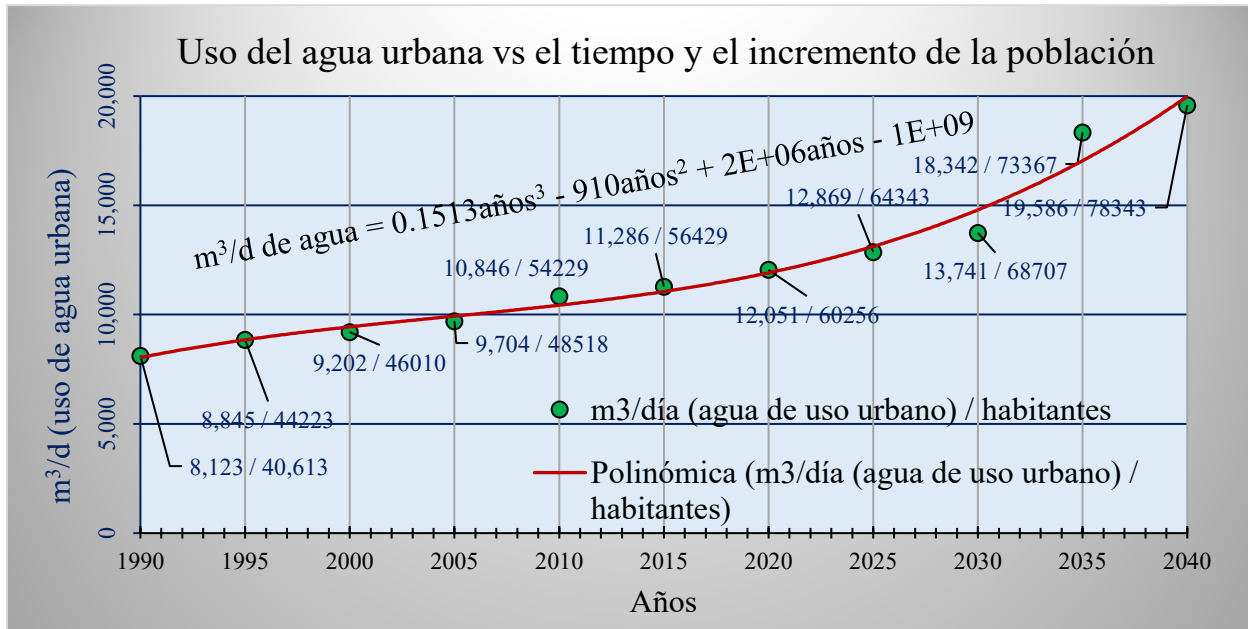
Tabla I-1. Representación del incremento demográfico de Actopan y estimado, señalando con una línea roja de tendencia exponencial el resultado esperado para este año (2020) de su población total. La R indica el coeficiente de correlación, es decir, que tan acertado es el resultado (margen de error del 0.002% aprox.). Elaboración propia



También, los servicios públicos con que cuenta Actopan en la disponibilidad del agua potable son parcialmente escasos, pues existen algunas localidades que carecen de agua entubada y sus drenajes se encuentran conectados a algún río o canal; en algunos casos se dificultan el conseguir este servicio. No obstante, este problema no se presenta en la cabecera municipal. Por otro lado, el incremento de la población interrelacionado con la agricultura en zonas de irrigación y abastecimiento de agua potable (agua urbana) generan más demanda de nuestra agua nacional, según el Gobierno del Estado de Hidalgo (GOB HG, 2002).

De manera que, debido a la falta de la aplicación de un ordenamiento ecológico territorial en el municipio, no se le da la importancia necesaria a las cuestiones ambientales, hidrológicas y geológicas, que son las bases (refiriéndonos, en un contexto en el cuál, la propia naturaleza nos provee de recursos naturales) de los asentamientos humanos y desarrollo urbano, así como la cabecera municipal de Actopan, esta con el paso del tiempo, si se torna una gran ciudad tenderá a

Tabla I-2. Representación del uso del agua urbana por m<sup>3</sup>/d en relación con la demografía de Actopan. Elaboración propia basado en Rodríguez Ruíz (2012).



diversificar cuestiones posiblemente negativas por actividades antropogénicas; un desequilibrio o riesgo ambiental, extracción excesiva del agua subterránea y subsidencia del terreno primordialmente.

Por lo que, la problemática principal de la presente investigación teórica refiere a los escasos de información acerca del sistema acuífero (agua subterránea) a nivel local; asuntos cómo el no contar con un control y manejo del agua, abastecimiento y un incremento en la población, de modo que, se pregunta, ¿El agua será suficiente para las próximas décadas en el municipio? ¿Será un suministro posterior para compartir a los estados colindantes?

El área de estudio se delimita a la fracción centro-sur del municipio de Actopan, cerca de las localidades de Santa María Magdalena, San Andrés Tianguistengo y zonas aledañas.

De acuerdo con lo anterior, nos da la oportunidad de estudiar lo mejor posible la naturaleza de las ciencias de la Tierra, la relación con los recursos hídricos y la geología, que implican tres de los factores más importantes en su evolución como sistema acuífero; agua, medio ambiente y tiempo. Y tiene una gran importancia en la aplicación de la hidrogeología, que



influye directamente con la población como herramienta en la sustentabilidad que provee el agua y permite un beneficio a la sociedad, medio ambiente y economía.

La finalidad del presente objeto de estudio se realiza con tal de elaborar un trabajo de investigación científica, consistiendo en modelos conceptuales 2D y 3D de la distribución del flujo de agua subterránea en el sistema acuífero de la región de Actopan, en el que, se tomen en cuenta las consideraciones y decisiones apropiadas al momento de efectuar las aplicaciones de la hidrogeología al bienestar de la sociedad. Posteriormente se pretende que, si es posible se integre como fragmento de algún proyecto, en el que ayude a solucionar lo más posible las problemáticas a nivel municipal, como lo son:

- La no planificación de un control adecuado en la extracción, abastecimiento y calidad del agua subterránea en las zonas urbanas, y estas mismas, en zonas rurales, con relación al uso del suelo.
- La falta de evaluación de las zonas ambientales en relación con el acuífero y cómo afectan nuestro medio ambiente, para evitar posteriores daños a los ecosistemas.
- Falta de información hidrogeológica y geológica en cuestiones locales, como lo son modelos de perfiles y mapas geológicos a detalle.
- Carestía de modelos conceptuales o gráficas acerca de la prevención en la contaminación del agua subterránea en zonas urbanas.

## **I.2. Objetivos**

### **I.2.1. General.**

Caracterizar la hidrogeología del sistema acuífero de la región de Actopan, para plantear modelos conceptuales 2D y 3D de la distribución del flujo de agua subterránea, aportando información hidrológica y geológica.





### **I.2.2. Específicos.**

- Recopilar la información en el municipio de Actopan, para sintetizar los datos más apropiados de la temática y en el campo de estudio.
- Generar la cartografía regional pertinente, topográfica, hidrogeológica y geológica local del municipio de Actopan, área de estudio y sus zonas aledañas, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para el análisis de los datos espacialmente georreferenciados.
- Elaborar un estudio hidrogeológico partiendo de 3 fases; 1) hidrología, para obtener parámetros hídricos de lo que ocurre en la parte superficial del área de estudio y como afecta al subsuelo; 2) geofísica, para interpretar lo que existe en el subsuelo y zonificar las áreas donde se tiene agua subterránea; 3) hidrogeología, se enfocará en explicar el movimiento del agua subterránea como un sistema-flujo que permitirá conocer sus cualidades, formación y sus características fisicoquímicas y biológicas entorno a la geología.
- Relacionar las características principales del municipio de Actopan, los antecedentes, el marco geológico, la hidrología, la geofísica y la hidrogeología para desarrollar la caracterización del sistema acuífero dentro del área de estudio.
- Elaborar columnas y secciones transversales, hidrogeológicas – geológicas (estratigráficas), para obtener una delimitación a nivel subsuelo, y así, interpretar el flujo de agua subterránea del sistema acuífero.
- Desarrollar modelos conceptuales 2D y 3D de la caracterización hidrogeológica del flujo de agua subterránea del sistema acuífero.

### **I.3. Hipótesis**

- Los problemas de abastecimiento del agua subterránea en Actopan, Hidalgo, son cada vez más frecuentes. Un estudio hidrogeológico permitirá caracterizar la zona con la finalidad de desarrollar modelos conceptuales 2D y 3D en el área de estudio, y así lograr una propicia demostración en la distribución del agua subterránea para un sustento de información en el municipio.
- Con el presente trabajo de investigación permitirá indicar como el agua subterránea pasa a través del subsuelo para explicar la inexistencia delimitación de esta y clasificarla, sugiriendo un término adecuado para sus estudios como un sistema, el comportamiento del flujo de agua y contribuir a la ciencia el concepto esencial de un sistema acuífero.
- De acuerdo con los modelos conceptuales hidrogeológicos 2D y 3D, se podrá obtener la cuantificación potencial del volumen de agua en movimiento hipotéticamente, ya que tiene diversos factores (desequilibrio antropogénico, calentamiento global, construcción de obras, etc.) que afectan en el parámetro y, por lo tanto, demostrar que nunca se podrá medir precisa ni exactamente, si no valores posiblemente cercanos a la realidad.

### **I.4. Justificación**

La presente investigación es pertinente en un contexto de interés científico en el área de la hidrogeología y la evolución de su estudio a través del tiempo, así como la importancia que se tiene de acuerdo con la carestía de información local y la relación con los problemas de abastecimiento de agua que enfrenta Actopan, cómo impactan en la sociedad y su economía.

Por consiguiente, es de gran relevancia obtener información de una caracterización hidrogeológica dentro de Actopan, obteniendo modelos conceptuales 2D y 3D referente a la distribución del flujo de agua subterránea, esta permitirá una propicia adquisición de información



pública en materia hídrica, que se puede tomar como sustento para planes de corto a largo plazo en el tema, por lo que, a los habitantes del lugar les servirá de utilidad.

En tal caso, el posible efecto por desinterés de alguna aplicación a lo que conlleva el agua, podría llegar a ser un riesgo en la economía agropecuaria, que es su principal fuente de trabajo (GOB HG, 2002) y llevaría al desempleo en un tiempo a futuro, debido a la necesidad de abastecimiento, afectando en el área de estudio a más de 2,810 habitantes con un grado de marginación medio – alto en las localidades de Santa María Magdalena, San Andrés Tinguistengo, El Arco, El Paje, La Mesa, El Meje y Fray Francisco (SEDESOL, 2010) principalmente.

El área se encuentra cerca de la cabecera municipal de Actopan, como consecuente, con el paso del tiempo será una atracción a la sobreexplotación de agua subterránea y también para suministrar en otras grandes zonas urbanas colindantes (Cuenca o Valle de México) o no, y como sistema acuífero (Actopan-Santiago de Anaya, clave 1313), tendría un resultado negativo tanto en el medio ambiente, economía, obras y sociedad principalmente.

El presente trabajo se acota en obtener información de parámetros acerca de la hidrología; estudios de la infiltración, climatología, red de drenaje, cuencas, subcuencas y microcuencas superficiales; Geofísica, estructuras en el subsuelo y la ubicación con el agua subterránea; Y geología, en relación con estudios de cartografía, geomorfología, litoestratigrafía y estructurales.

De manera que, será posible la elaboración de modelos conceptuales finales dos-dimensional y tres-dimensional de su hidrogeología, para determinar la distribución del flujo de agua subterránea en el sistema acuífero, en el cual, se tendrá un resultado de una favorable

adquisición de datos públicos en la materia hídrica. Esto desde sólo dos perspectivas; un enfoque hidrogeológico y otro geológico.

### **I.5. Metodología**

En esta sección, se explican las distintas actividades de gabinete. La metodología de trabajo se enuncia con la actividad realizada en los siguientes párrafos:

De acuerdo con Gallardo de Parada y Moreno Garzón (1999), se recopiló la información en dos niveles (epistemológico y teórico); el autor alude que para comenzar un trabajo es importante tener en cuenta las circunstancias históricas, psicológicas y sociológicas que llevan a la obtención del conocimiento, integrada por criterios que tratan a la realidad, y aplicar un sistema lógico-deductivo compuesto por hipótesis comprobadas que se aplican para confeccionar un método científico que interprete, observaciones en función de axiomas, postulados o consecuencias.

En el primer nivel se describió las características principales del municipio de Actopan, Hidalgo, México. Desde su nomenclatura, reseña histórica, localización del área de estudio, provincias fisiográficas, orografía, hidrografía, clima, flora, fauna hasta la edafología, que permitió formular la problemática, cuestiones y los objetivos.

El segundo nivel, se dispusieron los antecedentes o estudios previos (hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, geofísicos, entre otros), que se tomaron en consideración y se incluyó un estudio de relevancia acerca de los efectos de irrigación del agua residual en el subsuelo (véase en la sección VI.1). Se describieron los conceptos esenciales, que fueron de suma importancia para la construcción de una base sólida para el soporte teórico en la clasificación del flujo de agua subterránea.

Las principales fuentes de consulta son: 1) Páginas web reconocidas: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), *The Geological Society of America* (GSA), *United State Geological Survey* (USGS); 2) Artículos de divulgación científica; 3) Instituciones nacionales educativas: Instituto Politécnico Nacional (IPN) y Universidad Autónoma de México (UNAM).

Después, se realizó la cartografía siguiendo la teoría y métodos de acuerdo con la autora Gómez Escobar (2004); formula que es necesario identificar el tipo de mapa (cuantitativo y cualitativo) para su generalización, contar con los métodos de cálculos geométricos oportunos, siguiendo con la representación cartográfica, su respectiva simbología y características generales.

De manera que, se generó la cartografía digital. En los mapas regionales, se tomó el rango de escalas en 1: 100,000 – 1: 600,000 y para los locales de 1: 30,000. Estos en un sistema de coordenadas Transversal de Mercator (UTM) en el *World Geodetic System 84* (WGS84) y geográficas (GEO), por medio de un *software* especializado *ArcGIS* (versión 10.5) (ESRI, 2017), se adquirieron imágenes satelitales del sensor Sentinel 2 (EESA, 2017)<sup>1</sup> con una resolución espacial de 10 m en las bandas 2 (azul), 3 (verde) y 4 (rojo), que ayudó a corroborar la georreferenciación y datos espaciales. Además, se utilizaron datos de modelos digitales de elevación, con formatos banda intercalada por línea (BIL), *Tagged Image File Format* (TIF o TIFF) (INEGI, s.f.) y *Digital Model Elevation* (DEM) del sensor ALOS PALSAR (UAF, 2010).

Más tarde, se elaboraron los mapas geológicos y columnas estratigráficas regional y local de acuerdo con criterios inherentes de la temática que consistieron en las siguientes secciones:

---

<sup>1</sup> Para la descarga de las imágenes satelitales véase más en: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

- La primera se tuvo que localizar y delimitar el área regional, elaborando el mapa geológico a escala 1: 600,000 de datos espacialmente georreferenciados (López Ojeda, 2017) en formato *Keyhole Markup Language* (KML) para convertirlos a capas de archivos nativos ráster en referencia de la carta geológico-minera de Pachuca, Hidalgo, clave F14-11 (SGM, 1997). Después, la columna estratigráfica se obtuvo con el *software* de *AutoCAD* (versión 2020) en base a los autores descritos en el tema de estratigrafía. Se optimizó la simbología litológica en la información de la *Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization* (FGDC, 2016) debido en algunos casos de la complejidad en las rocas, para ello, se utilizó el *software Paint*, guardándolas en formato *Bitmap* y añadiéndolas en *ArcGIS*.
- La segunda, el mapa geológico local se mostró en una vista rápida de escala 1: 150,000 y en una local de 1: 30,000 (véase en anexos, Mapa I); se elaboró a partir del traspaso de información, convirtiendo de formatos PDF a TIFF las cartas Actopan (F14-D71) y Pachuca (F14-D81) y se georreferenció por el método de puntos de control (con la herramienta *Georeferencing – Add Control Points*, rectificándola [*rectify*] y guardándola) modificando el empare de la litología que no correspondían. Para la columna estratigráfica, se realizó en base a la información del léxico estratigráfico local y en la geofísica.

Con esto, se reconoció la litología y edades de las rocas y la relación que existe con la disposición espacial y características fisicoquímicas que influyeron en la distribución del agua en el sistema acuífero.

Con base a la transcripción de los datos en las cartas geológico-mineras se obtuvo el mapa estructural y se generó una roseta de diaclasas observando los mayores eventos de

fracturamiento en la zona de estudio, que fue de gran importancia al momento de interpretar las secciones y modelos conceptuales.

Posteriormente, se descargaron los modelos digitales de elevación (MDE) de INEGI del año 2013 y 2016 (INEGI, s.f.; UAF, 2010), con ayuda del *software Global Mapper* (v.18) se añadió cada MDE logrando un mejor tratamiento de la información; para ello, se configuró en las opciones, el sistema de proyección a utilizar, se exportó a formato *American Standard Code for Information Interchanged* (ASCII), modificando que el tamaño del pixel fuera igual en los ejes “y, x”, y por último, se reproyectó al sistema de proyección trabajado, después, con *ArcGIS* (10.5) se convirtieron los archivos ráster en formato “*Grid*” (Cuadrilla) con la herramienta *ASCII to Raster*.

Para los límites estatales y municipales se utilizó la información del marco geoestadístico por INEGI (2018).

Prosiguiendo, se elaboró la red de drenaje, descargando los archivos topográficos e hidrográficos de INEGI del año 2010 y 2015 (INEGI, s.f.), primero se recortaron los MDE (comando *Raster Processing – Clip*) y con la herramienta *Spatial Analyst Tools – hydrology* el proceso fue el siguiente: 1) *Fill*, utilizando el MDE como la superficie del ráster, sirvió para rellenar y quitar errores en la resolución de datos; 2) *Flow direction*, manejando *Fill*, creó la dirección del flujo en distintos valores (1=este, 2=sureste, 4=sur, 8=suroeste, 16=oeste, 32=noroeste, 64=norte, 128= noreste); 3) y por último, *Flow accumulation*, manipulando *Flow direction*, para el tratamiento de la información en la cantidad de agua de cada celda que fluye dentro de esta desde todas las celdas que drenan hacia ella, se consiguió una mejor visibilidad del drenaje, con *Map Algebra*, se usó la condicional (*Con*) en la acumulación del flujo y se plasmaron valores bajos-medios (200 a 1200, 1).

A partir de todas las redes generadas, se eligieron bases de datos para su reinterpretación óptima, visualizando los drenes que más se repitieron, considerando también la vegetación y los asentamientos humanos con las imágenes satelitales.

Haciendo esto, se consiguió un análisis de la divisoria de agua en el relieve, y se alcanzó a delimitar las microcuencas existentes en el área de estudio, de próximo, se utilizaron en parámetros morfométricos hidrográficos.

Más tarde, se generó las microcuencas en base a Puerta Tuesta, Rengifo Trigozo y Bravo Morales (2013, pág. 75); mencionan el procedimiento para realizar la delimitación de una cuenca, por tanto, se eligió un punto de aforo (localización en la intersección de dos drenes, dentro del ráster analizado con *Map Algebra*) y la dirección del flujo, después, con la herramienta *Watershed* generó un formato ráster (cuencas). Después, se convirtió a formato vectorial con ayuda de *Raster to Polygon* y se editaron los polígonos cuidadosamente para los detalles de la divisoria de agua.

Se hicieron los cálculos precisos y exactos y se consiguió una buena cuantificación y caracterización del agua superficial.

A continuación, se crearon los parámetros morfométricos para cada microcuenca, consistiendo en la metodología de acuerdo con Canchari (2013); describe los pasos a seguir para la obtención de la morfometría (área, perímetro, cotas, centroide, curva hipsométrica, frecuencia de altitudes, altitud y pendiente promedio) de una cuenca hidrográfica a su superficie.

El primer paso, se adquirieron los parámetros generales con ayuda del comando *Interpolate Shape* (interpolación por forma), que es la combinación de información ráster con vectorial, y fue de gran utilidad al conseguir los datos deseados. Prosiguiendo, con un MDE y cada unidad hidrográfica vectorial adquirida, se interpoló por sombra para cada cuenca, y en sus





tablas de atributos (*Table Options*) se fabricaron nuevos campos (*Add Field*), haciendo *click* derecho en cualquier columna, se efectuaron las magnitudes deseadas (*Calculate Geometry*), y con ayuda de una hoja de excel, se cumplieron los cálculos pertinentes para los parámetros generales.

El segundo paso, se adquirieron los parámetros del relieve, constando de lo siguiente:

- Se recortó el MDE en cada unidad hidrográfica y se generó la pendiente (*Slope*) en porcentaje, después se interpoló la pendiente con su respectiva cuenca, generando un archivo vectorial, y con este se realizó una estadística (*Zonal Statistics as Table*) utilizando el vector interpolado y el ráster de la pendiente.
- Se interseccionaron (*Geoprocessing – Intersect*) las redes de drenaje con su correspondiente unidad hidrográfica, y se eligió el cauce principal como el dren más largo; se creó un archivo *shapefile* polilínea en una carpeta, se editó (*Editor – Start Editing*) trazándolo, se interpoló el dato con el MDE y finalmente con *Calculate Geometry* se consiguieron las magnitudes deseadas.
- Se reclasificaron los MDE con su respectiva cuenca en intervalos iguales, esta reclasificación se interpoló por sombra con su MDE y se obtuvo una estadística. Se consiguió una mejor precisión del área, al convertir de formato ráster a vectorial la reclasificación (*Raster to Polygon*), creando un campo nuevo “área [km<sup>2</sup>]” y con ayuda de la herramienta *Summarize* se sumó el área conforme al campo *Gridcode* [valores de intervalo].

El tercer paso, se consiguieron los parámetros de la red de drenaje, interseccionando la red general con su respectiva cuenca, después se crearon nuevos campos en su tabla de atributos y se clasificó interpretando la red de drenaje en base a Horton (1945).

Todos estos parámetros sirvieron de apoyo en la descripción de las microcuencas y en el análisis del balance hidrológico.

En seguida, se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura media mensual en la página web del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL, 2019), se localizó el área de estudio, para después, por medio de la herramienta *Funciones de redes – Visualizar flujos corrientes arriba*, se eligió un punto de aforo de las unidades hidrográficas y se consultaron los datos con el análisis de gráfico. Cabe mencionar que estos datos se trabajaron a escala 1:250,000, por lo que, cualquier información de esta índole es a la misma escala.

Posteriormente, con ayuda del método constituido por Thornthwaite (1944) se efectuaron los cálculos correspondientes y se obtuvo las magnitudes de la evapotranspiración.

Después, se descargó la capa temática de la hidrología superficial de INEGI (1984) y se recortaron los coeficientes de escurrentía con su respectiva unidad hidrográfica, y así, generaron los cálculos adquiriendo la infiltración del agua superficial en m<sup>3</sup>. Tras finalizar, se consiguió una caracterización superficial del agua, que posteriormente fue de apoyo en la relación que influyó con el agua subterránea.

Previo a lo ya mencionado, se requirió conocer la estructura del subsuelo en el área de estudio, con ayuda de la empresa Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo, S.A. de C.V. (EPYESA, 2019) se proporcionaron los registros electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) en columnas puntuales, puntos de los niveles estáticos del agua subterránea y secciones geoelectricas, que se reinterpretaron con la litología ya descrita, el léxico estratigráfico y la información hidrológica. Se hizo una relación con el agua dentro del subsuelo y definieron estructuras, por medio del *software AutoCAD* (versión 2020).

Realizando la interpretación, se consiguió la caracterización del subsuelo y la ubicación del agua subterránea, que fue una vital parte del estudio hidrogeológico.

Prosiguiendo, se tomó en conciencia la parte explicativa del agua subterránea y se realizó una clasificación regional por su tiempo, distancia, salinidad, y una local por su salinidad, distancia y profundidad respecto a la superficie del relieve, esta sujeta al nivel del mar, de la cuál, se sustentó mucho en parte de la teoría del capítulo I, dentro de los conceptos esenciales. Se ocupó en gran fragmento los estudios realizados por Chevotarev (1955) y Tóth (1999); se consideraron los elementos clave que casi no pudiesen variar, a pesar de su incertidumbre en una cuestión de diversos procesos, en que las rocas (intemperismo) intervienen contra la migración de sales solubles (concentración salina) en el agua subterránea.

Como resultado, permitió la clasificación del flujo de agua subterránea dentro del área de estudio y la relación que existe y existió durante la formación de la cuenca de Actopan, Hidalgo.

Finalmente, se elaboraron los modelos conceptuales hidrogeológicos 2D por medio del software *AutoCAD* (versión 2020); Se traspasó la información del Mapa I, a imagen desde *ArcGIS*, se insertó *AutoCAD* y se escaló, después se realizaron los modelos a partir de las secciones geológicas. Por último, se elaboró el modelo conceptual digital 3D; desde *ArcGIS*, se traspasó toda la información requerida a formato CAD, se abrió el archivo en *AutoCAD* y se modificaron las curvas de nivel a cada 10m, reinterpretablas, debido a errores de cálculo por el anterior programa, esta fue la base para su elaboración, después con ayuda del *software 3ds Max* (versión 2020) se importaron las curvas de nivel en su unidad origen (m) para crear un objeto compuesto llamado “*Terrain*”, después se fabricó un plano de 200 por 200 secciones haciendo una nueva superficie con datos más regulares, se exportó a DWG, para realizar el modelo en *AutoCAD* cortando un volumen respecto a la superficie, se hizo lo mismo para crear superficies

de las formaciones rocosas y efectuó el mismo procedimiento. Al último, se relacionaron los diversos factores, describiéndolos cualitativa y cuantitativamente.

## **I.6. Características principales del municipio de Actopan**

### **I.6.1. Nomenclatura.**

Según el Gobierno del Estado de Hidalgo (GOB HG, 2002): El término Actopan refiere al origen otomí derivado de “*Atoctli*”, que significa “tierra gruesa, húmeda y fértil”; y “*Pan*”, que es “en o sobre”, que conforman el nombre de dicho municipio (...) El nombre actual no es el correspondiente del original, ya que sufrió un cambio en su estructura gramatical. Cabe mencionar que el nombre original de la región es “*Mañutzi*”, que significa “mi caminito”. (sección de Nomenclatura, párrs. 1 y 3)

El Glifo que representa actualmente al municipio, está conformado por una caña de maíz en jilote y mazorcas sobre un terrón dibujado como un disco, sembrado en su interior de puntos o granos gruesos, incluso este glifo lleva el nombre escrito del municipio con caracteres españoles antiguos. (GOB HG, 2006, pág. 7)



### **I.6.2. Reseña histórica.**

Existen pocos datos históricos de Actopan, en un estudio (GOB HG, 2002) menciona que los toltecas arribaron al lugar alrededor del año 674, tiempo que se situaron cerca de Ixmiquilpan. En el año de 1117, los chichimecas hicieron presencia en lo que ahora es Mixquiahuala y Actopan. En el año de 1113, el anciano Xide, al frente de un numeroso grupo de guerrilleros llegó al actual Actopan y le dio el nombre de Mañutzi. Resultado de esto, los chichimecas invadieron Actopan. En el año de 1120 y a causa de la irrupción chichimeca, Actopan quedó a la defensa del territorio de Acolhuacan, hasta que el emperador Moctezuma

incorporó la región del Valle del Mezquital a sus dominios, recibiendo así la región otomí la influencia del náhuatl.

### **I.6.3. Localización del área de estudio.**

El área de estudio se limita al municipio de Actopan (véase Fig. I.1) según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), cuenta con un área de 94.90 km<sup>2</sup> con coordenadas UTM, X (m E) = 507967.405494 y 516922.756481, Y (m N) = 2247869.293068 y 2237271.902069. Se localiza al norte de la Ciudad de México a una distancia de 120 km aproximadamente, se puede llegar tomando la Av. Insurgentes Nte., hasta que se torne la carretera Federal Pachuca - México (núm. 85) y por la autopista arribando al municipio. Este colinda al noroeste con Santiago de Anaya, al noreste con Metztlán y Atotonilco el Grande, al sureste con Mineral del Chico, El Arenal y San Agustín Tlaxiaca y al suroeste con Ajacuba y San Salvador. Se cuenta con una extensión superficial de 271.586 km<sup>2</sup> y representa el 1.33 % de la superficie total del estado de Hidalgo (GOB HG, 2002; INEGI, 2018).

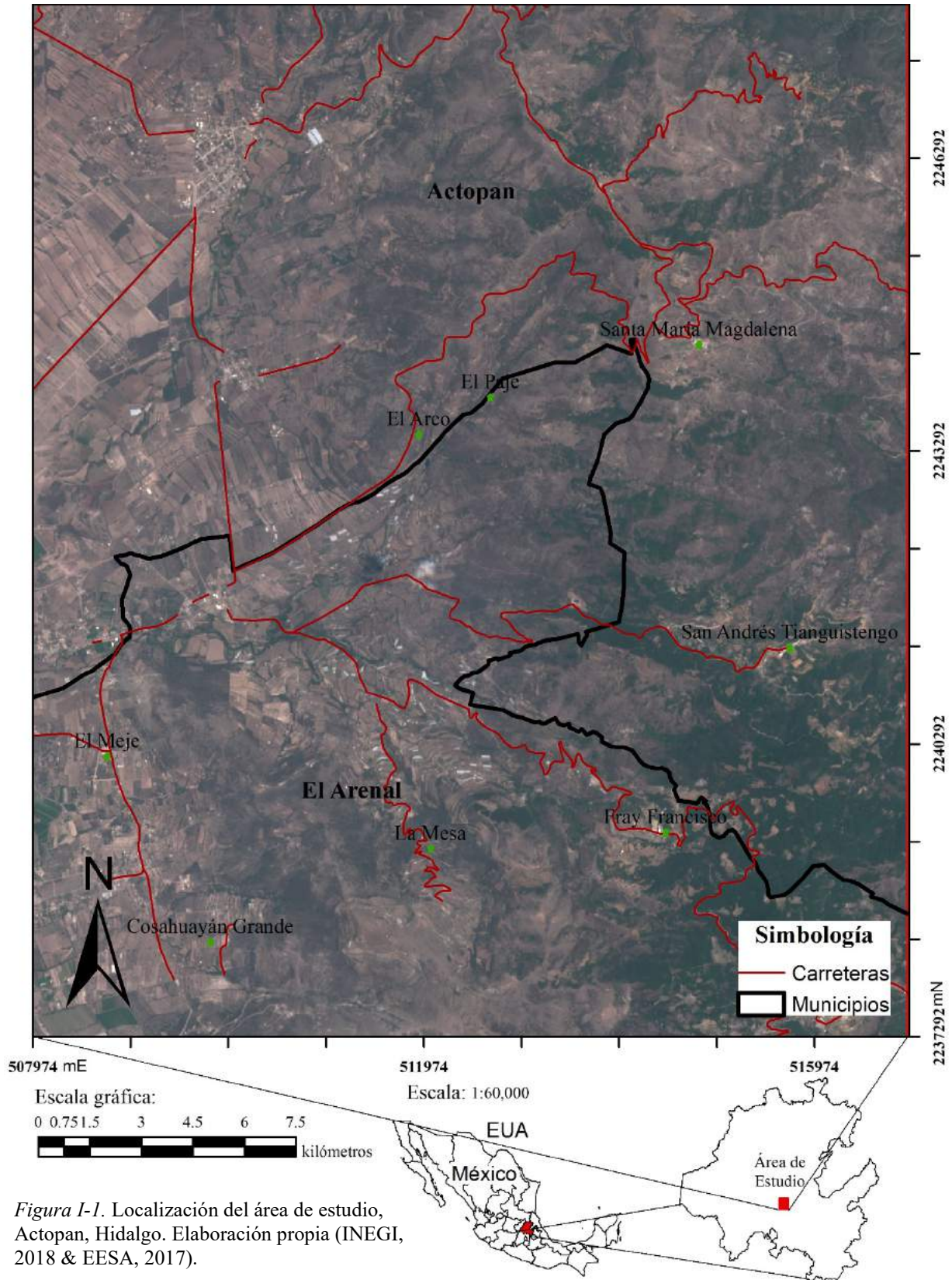


Figura I-1. Localización del área de estudio, Actopan, Hidalgo. Elaboración propia (INEGI, 2018 & EESA, 2017).



#### **I.6.4. Provincias fisiográficas.**

El área municipal de Actopan se encuentra dividida entre dos grandes provincias fisiográficas (véase Fig. I-2); la Sierra Madre Oriental (SMO) cuenta con una extensión superficial de 135.734 km<sup>2</sup> y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) con 135.851 km<sup>2</sup> dentro del área municipal (INEGI, 2004).

Los autores Álvarez (1961), Tamayo (1941), Raisz (1959) y De Cserna (1960) (citado en Eguiluz de Antuñano, Aranda García y Marrett, 2000) designan a la SMO a un rasgo orográfico, formado por un macizo montañoso rugoso, angosto y alargado, situado en el oriente de la República Mexicana, que emerge de la planicie costera del Golfo de México y se yergue majestuoso e imponente, con cumbres que sobre pasan los 2,500 metros sobre el nivel del mar, luego descienden de altura hacia el poniente y pasan a una extenso altiplano situado en el centro del país; ubican a la SMO a partir de la FVTM y la proyectan en forma continua hacia el N-O, internándose en la parte central de Coahuila y Chihuahua, hasta la frontera norte México. La SMO es una unidad fisiográfica, con más de 800 km de longitud y de 80 a 100 km de amplitud. En términos geológicos, la SMO es el producto del levantamiento y deformación de rocas principalmente mesozoicas, incluido su basamento heterogéneo, por otra parte, corresponde a una franja del frente plegado y cabalgado durante el período de deformación conocido como laramídico, al que De Cserna (1960), denominó Hidalgoense. (pág. 2)

Se define a la faja volcánica Transmexicana (FVTM) como un arco magmático continental, constituido por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos, que se extiende desde las costas del Pacífico, en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz. La provincia tiene aproximadamente 1,000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km, y se



distribuye con una dirección preferencial E-O en su parte central y oriental, ONO-ESE en su parte occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana... Se ha vuelto costumbre la división de la FVTM en tres porciones o sectores con base en su geología y tectónica; occidental, central y oriental, de la cual nos encontramos en la parte oriental. (Demant, 1978 & Pasquaré et al., 1988; citado en Gómez Tuena, Orozco Esquivel y Luca Ferrari, 2005, pág. 228)

Luca Ferrari (2000) expresa que: “Este arco magmático se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco”. (pág. 85)

#### **I.6.5. Orografía.**

Gran parte del municipio de Actopan tiene una porción considerable de la SMO con los rasgos orográficos en sus cordilleras. De las principales elevaciones del municipio se encuentran, el Cerro Grande con una altitud de 2,001 metros sobre el nivel del mar (msnm) ubicado entre las localidades de La Estancia y Santa María Magdalena; el Cerro Corona con una elevación de 2,560 msnm situado al sudeste [suroeste] del municipio; el Cerro La Bandera con 2,520 msnm muy próximo al municipio de Santiago de Anaya y entre otras cimas de gran importancia encontramos al Cerro Plomosas y al Cerro Alto (véase, Fig. I-3, para observar el relieve municipal) (GOB HG, 2002, sección de Orografía, párrs. 1 y 2).

#### **I.6.6. Hidrografía.**

La hidrografía del municipio de Actopan se encuentra dentro de la región del Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma, de la cual derivan tres subcuencas: Blanco – Amajaque con una superficie de 129.042 km<sup>2</sup>, que es el 47.51 % del municipio, San Juan – Tula con 142.517 km<sup>2</sup>



de superficie ocupando el 52.47 % y, por último, una pequeña parte de la subcuenca Salomón con un área superficial de 0.026 km<sup>2</sup> que es el 0.02 % (véase, Fig. I-4) (CONABIO, 2008).

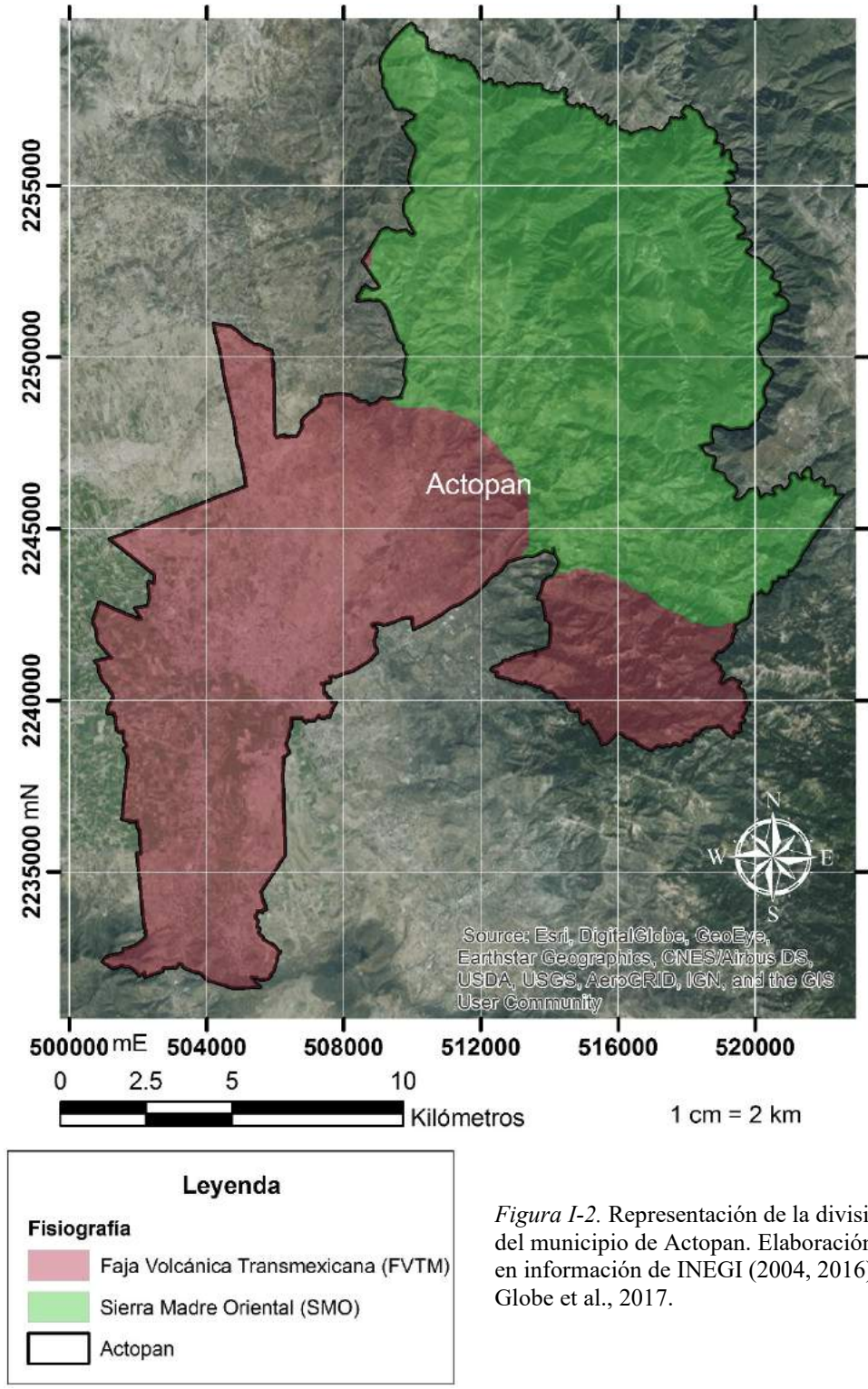


Figura I-2. Representación de la división fisiográfica del municipio de Actopan. Elaboración propia con base en información de INEGI (2004, 2016) & Digital Globe et al., 2017.

Las principales corrientes que lo conforman son: Chicavasco y puente de palo en su parte sur; Las Mecas, San Nicolás, Las Milpitas y La Ordeña en el norte, y Gualulo, Magdalena, El Paje, La Fuente y el Sabino al oriente. (GOB HG, 2009)

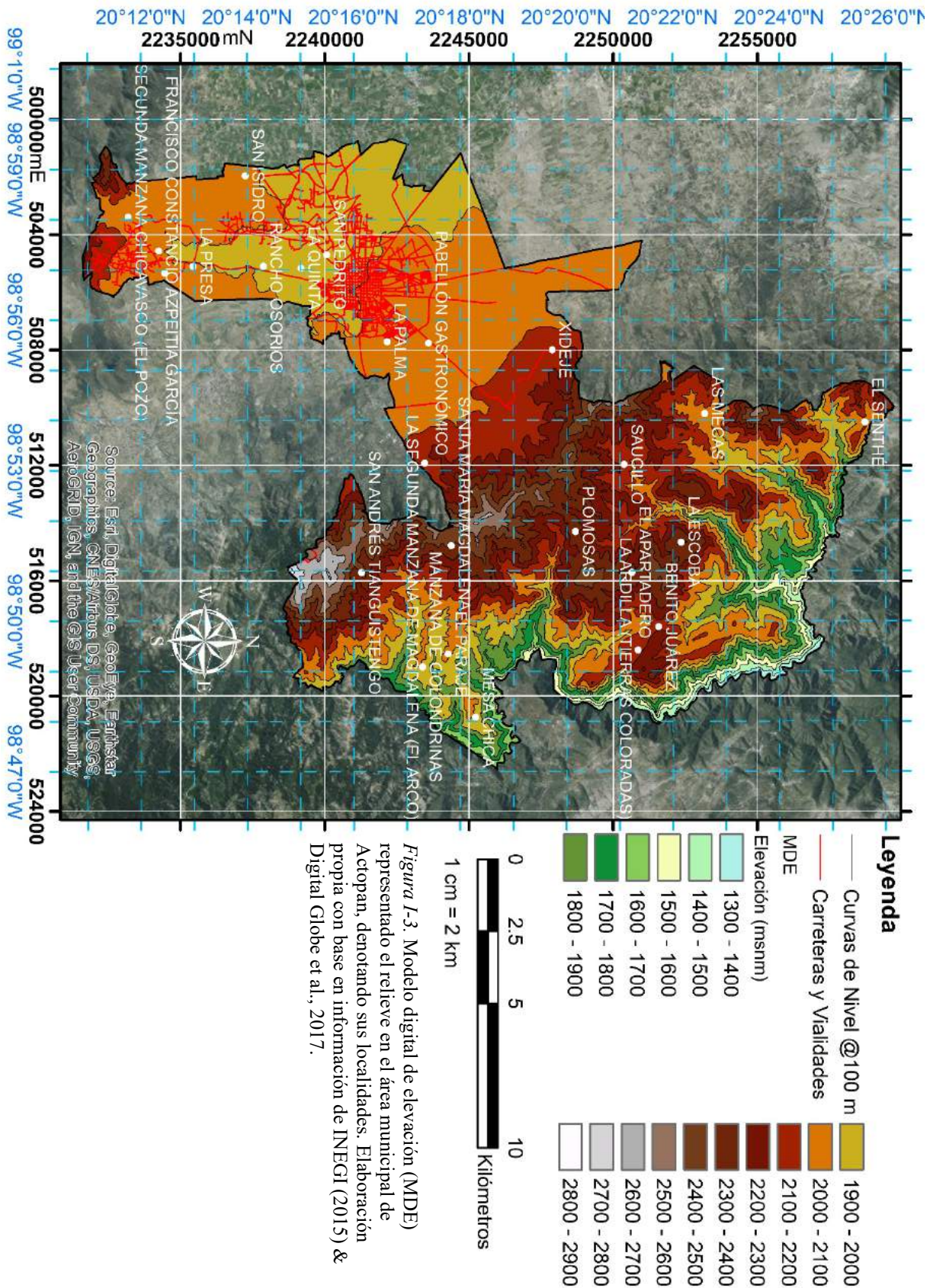
### I.6.7. Clima.

La temperatura promedio mensual en el municipio oscila entre los 13°C para los meses de diciembre y enero, siendo los más fríos del año y 20°C para el mes de mayo, que registran las temperaturas más altas. La estación meteorológica de la ciudad de Actopan, tras 40 años de observación, ha estimado que la temperatura anual promedio es de aproximadamente 16°C (véase Fig. I-5 y Tabla I-3). Con respecto a la precipitación anual en el municipio, el nivel promedio observado es de alrededor de los 390.1 mm. Según datos observados desde hace más de 40 años, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación y los de febrero y diciembre los de menor (GOB HG, 2009; GOB HG, 2002).

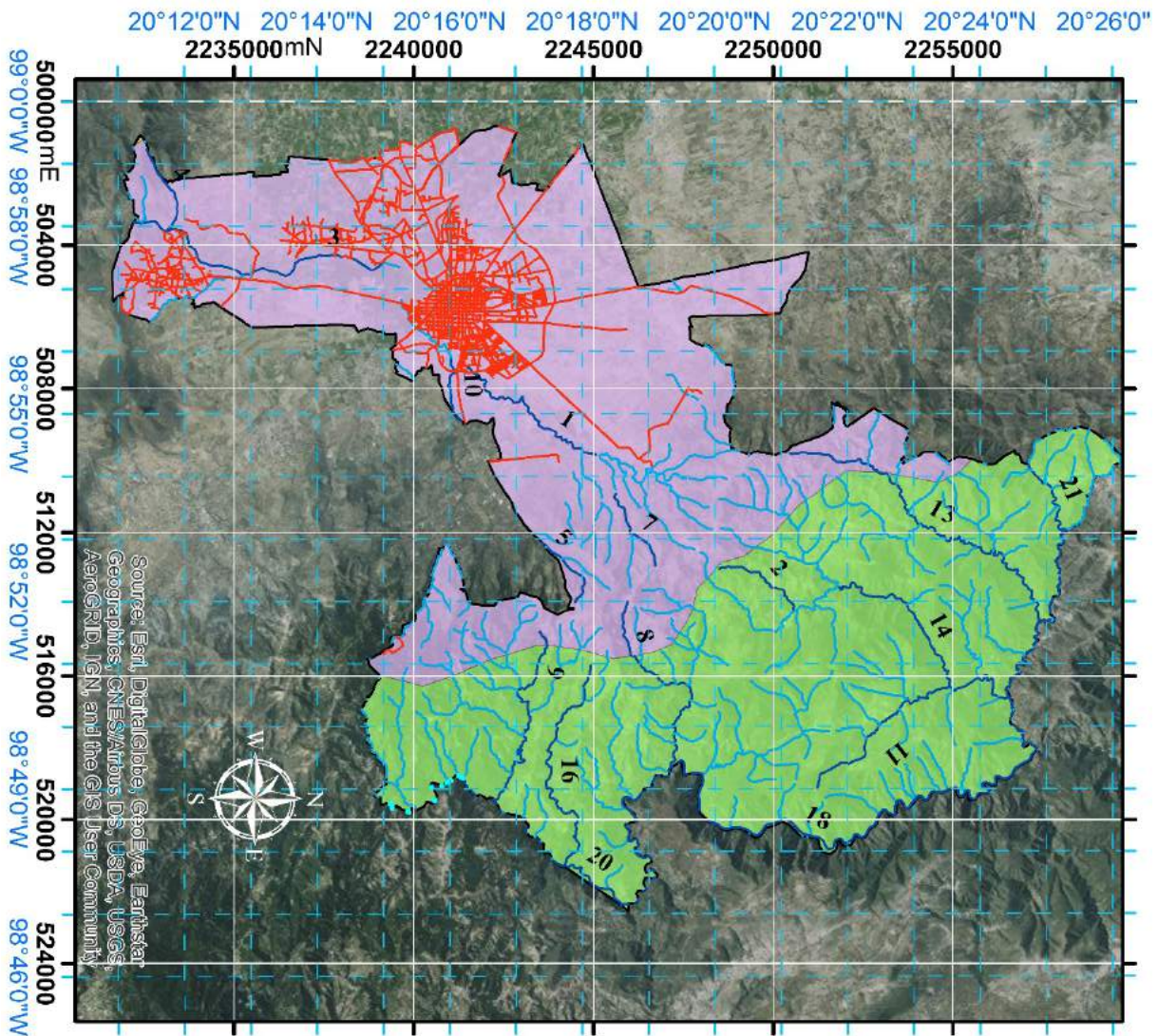
Tabla I-3. Representación gráfica del clima en Actopan. Elaboración propia a partir del mapa climatológico.

Simbología	Tipo de Clima	Temp. media anual (°C)	Temp. del mes más frío (°C)	Temp. del mes más caliente (°C)	Precipitación Total anual	
					(%)	(mm)
BS1kw	Semiárido a templado	12 – 18	3 – 18	22	Lluvias de verano e invernal del 5 – 10.2 %	
C(m)	Templado a húmedo				Lluvia de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 – 10.2	Precipitación del mes más seco <40
C(w1)	Templado a subhúmedo				Lluvias de Verano con índice P/T 43.2 – 55. Porcentaje de precipitación invernal 5 – 10.2	
C(w2)	Templado a subhúmedo				Lluvias de Verano con índice P/T >55. Porcentaje de precipitación invernal 5 – 10.2	
C(wo)	Templado a subhúmedo				Lluvias de Verano con índice P/T < 43.2. Porcentaje de precipitación invernal 5 – 10.2	

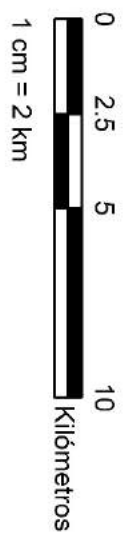
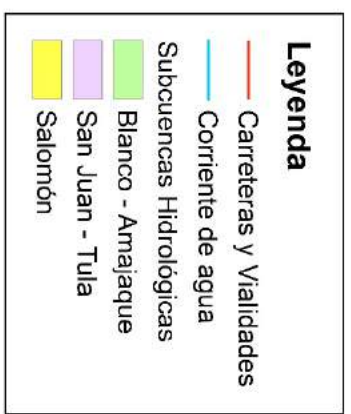








Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



*Figura I-4.* Mapa hidrológico de Actopan. Representando la división de las subcuencas hidrológicas y sus corrientes: 1) Arroyo el Toril; 2) Cerro Blanco; 3) Chicavasco; 4) El Cajón; 5) El Paje; 6) El Sabino; 7) El Toril; 8) Gualulo; 9) La Fuente; 10) La Mora; 11) La Ordeña; 12) Las Cajas; 13) Las Mecas; 14) Las Milipitas; 15) Los Driegos; 16) Magdalena; 17) Otatal; 18) Río Amajac; 19) Río Grande; 20) Río San Andrés; 21) Río Shenté. Elaboración propia con base en información de INEGI (2015) & Digital Globe et al., 2017.





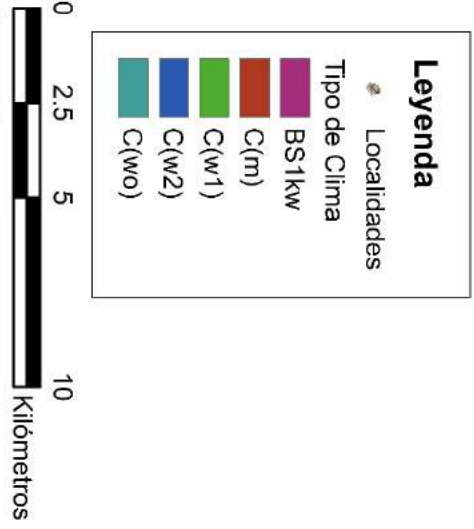
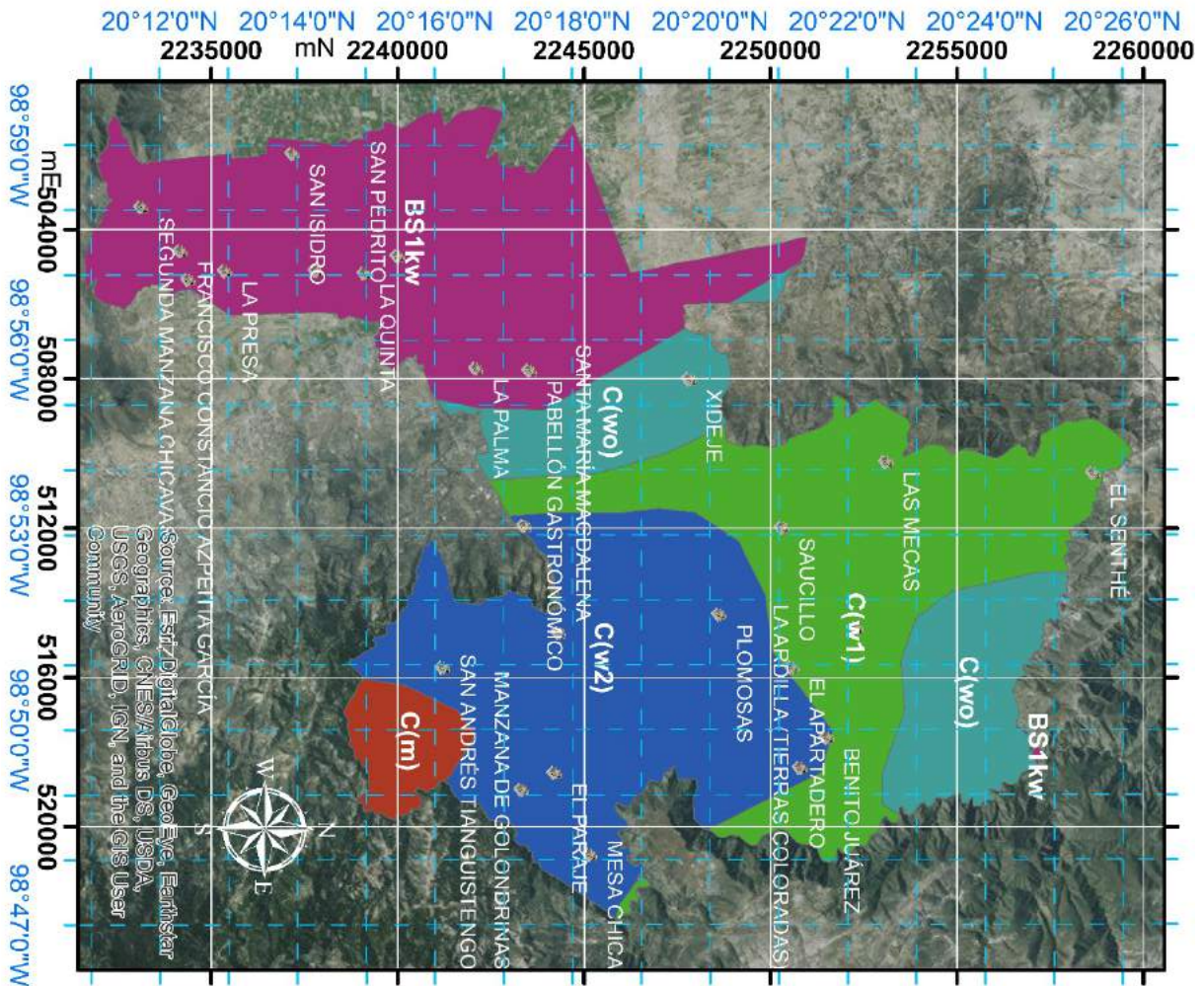
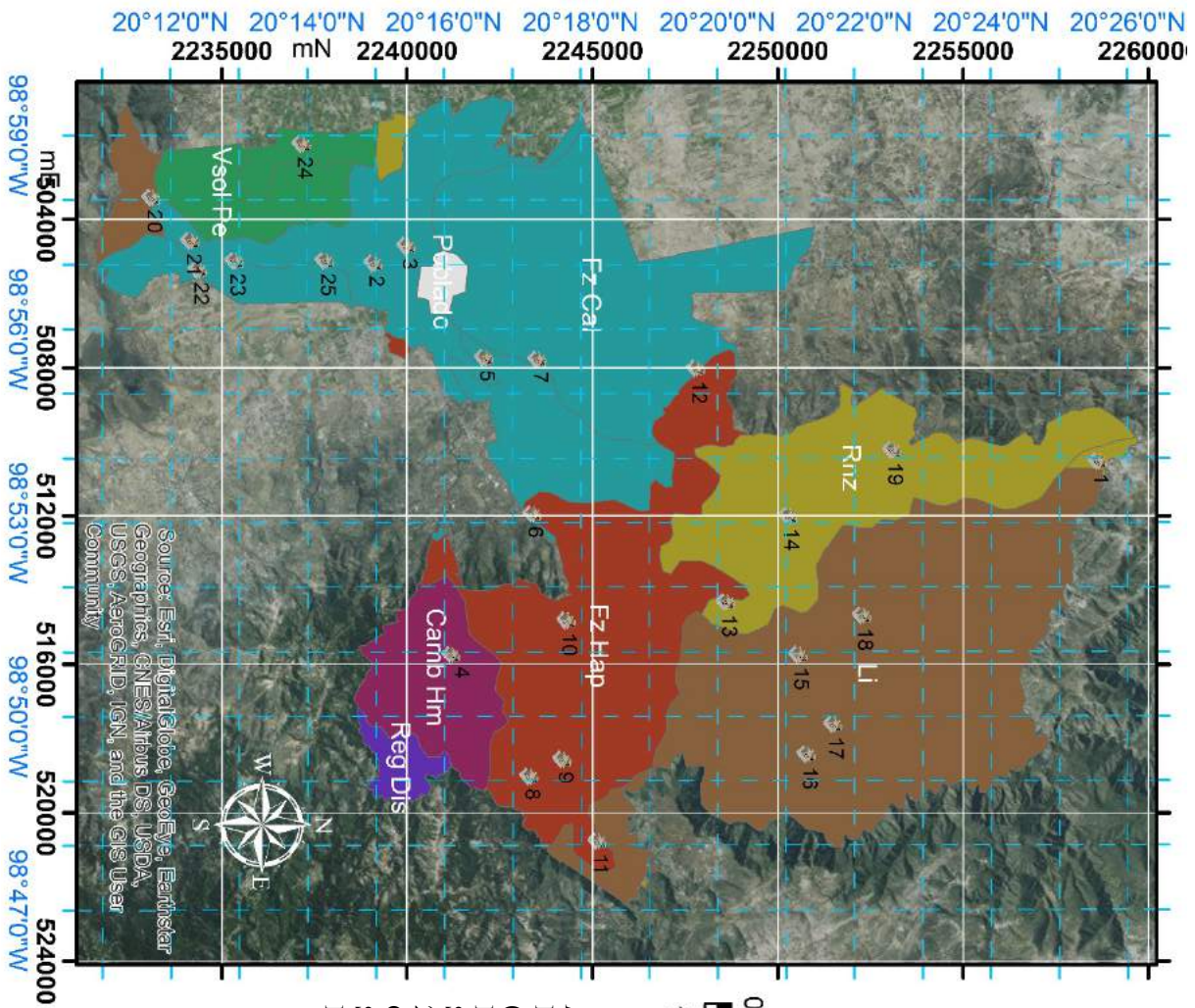


Figura I-5. Mapa climatológico de Actopan. La descripción se presenta en la Tabla I-1. Elaboración propia a escala 1:200,000 tomado de CONABIO, 2008 (clasificación de Köppen, modificado por García & Digital Globe et al., 2017).





*Figura I-6.* Mapa edafológico. Cambisol húmico (Camb hm); Feozem Calcárico (Fz Cal); Feozem Háptico (Fz Hap); Litosol (Li); Regosol districo (Reg Dis); Rendzina (Rnz); Vertisol Pelico (Vsol Pe). Localidades: 1) El Senthe; 2) La Quinta; 3) San Pedrito; 4) San Andrés Tanguistengo; 5) La Palma; 6) La 2<sup>da</sup> Manzana de Magdalena (El Arco); 7) Pabellón Gastronómico; 8) Manzana de Golondrinas; 9) El Paraje; 10) Santa María Magdalena; 11) Mesa Chica; 12) Xideje; 13) Plomosas; 14) Saucillo; 15) El Apartadero; 16) La Ardilla



### I.6.8. Flora.

La flora en el municipio tiene una vegetación compuesta en su mayoría por matorrales inermes y espinosos, pastizales, magueyes, cimarrones, nopales, mezquites, garambullos, pitahayas y biznagas. Existen algunos árboles como pirules, encinos, huizaches, fresnos y oyameles. La diversidad de la flora es contrastante; mientras que en la parte baja correspondiente al Valle del Mezquital es escasa y de características semidesérticas, la parte alta presenta regiones semihúmedas y boscosas mayoritariamente forestal (GOB HG, 2002, sección de Principales Ecosistemas, párrs. 1 y 2)

Tabla I-4. Parámetros de temperatura y precipitación promedio anual de Actopan, Hidalgo (Tomado de: Wiki, 2017; citado en el Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2015).

Parámetros climáticos promedio de Actopan (1951-2010).													
Mes	Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temperatura Máx. Abs. (°C)	32.0	32.5	47.0	39.0	42.0	37.0	34.0	37.0	33.0	36.0	31.0	32.0	47.0
Temp. Máx. Media (°C)	22.3	24.2	27.1	28.6	28.7	26.5	24.9	25.2	24.2	23.7	23.0	22.3	25.1
Temp. Media (°C)	12.6	14.0	16.6	18.6	19.4	18.9	17.9	18.0	17.6	16.1	14.2	13.0	16.4
Temp. Mín. Media (°C)	3.0	3.9	6.1	8.6	10.1	11.3	11.0	10.8	10.9	8.5	5.4	3.7	7.8
Temp. Mín. Abs. (°C)	-7.0	-6.0	-4.0	-3.0	1.0	2.0	1.0	1.5	0.2	-3.0	-5.0	-8.0	-7.5
Precipitación total (mm)	10.9	6.1	10.5	26.6	39.8	65.5	63.6	50.4	63.9	38.3	9.5	5.0	390.1
Días de lluvias (≥ 0.1)	2.0	1.8	2.5	4.7	6.7	9.3	10.1	8.5	10.1	6.1	2.8	1.6	66.2

### **I.6.9. Fauna.**

La fauna perteneciente a esta región está compuesta en su mayoría por especies características de climas semidesérticos, como lo son los conejos, ardillas, los tlacuaches, el armadillo, el gato montés, el coyote, el halcón y las víboras de cascabel. La existencia de un suelo árido y las escasas lluvias temporales que se presentan en el Valle del Mezquital, propician la presencia de coralillos, escorpiones, lagartijas, camaleones, ciempiés, alacranes, tarántulas, arañas, grillos, chapulines, hormigas y pinacates. (GOB HG, 2002, sección de Principales Ecosistemas párrs. 1 y 2 )

### **I.6.10. Edafología.**

Los orígenes de los suelos en el municipio (véase Fig. I-6) se deben a las condiciones geológicas, hidro-climáticas, geomorfológicas y por la cubierta vegetal. Las unidades edafológicas son relativamente jóvenes (Cambisol y Feozem). La mayor parte de los suelos presentan fases dúricas, líticas y petrocálcicas, que se desarrollan sobre materiales aluviales y rocas calizas que carecen de una fase física. La morfología de las montañas con un sustrato geológico de andesitas – brechas volcánicas (con % de SiO<sub>2</sub> intermedio), dan origen a los Cambisoles. Los suelos Feozem se forman por materiales no consolidados y tienen una importante capa orgánica y estos proporcionan las mejores condiciones topográficas y de fertilidad para la agricultura ocupando el 46% de la superficie municipal (ver Tabla I-3) (Díaz, 2013 e INIFAP, 2008).



Tabla I-5. Descripción edafológica de Actopan. Elaborada a partir del mapa edafológico. (INIFAP, 2008)

Tipo de Suelo y Ubicación		Textura	Fase Física	Descripción Química	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Cambisol Húmico (Camb Hm) de San Andrés Tlanguistengo		Media	s. inf.	s. inf.	13.662678	5.03
Feozem Calcárico (Fz Cal)	San Pedrito	Media	s. inf.	s. inf.	81.112539	29.86
	Pabellón Gastronómico	Fina	Petrogypsica	s. inf.		
	La Palma	Fina	Dúrica Profunda	s. inf.		
	La Presa	Media	Dúrica Profunda	s. inf.		
Feozem Háplico (Fz Hap)	Santa María Magdalena	Media	Lítica	s. inf.	46.61339	17.16
	Sureste del Poblado	Gruesa	Dúrica Profunda	Salina		
Litosol (Li)	La Escoba	Fina	s. inf.	s. inf.	77.306493	28.46
	2 <sup>da</sup> Manzana de Chicavasco (El Pozo)	Media	s. inf.	s. inf.		
Regosol Dístico (Reg Dis, Sureste de San Andrés Tlanguistengo)		Media	Lítica	s. inf.	3.06117	1.12
Rendzina (Rnz)	El Senthé	Fina	Petrocálcica	s. inf.	35.316338	13.00
	Las demás localidades	Fina	Lítica	s. inf.		
Vertisol Pélico (Vsol Pe) Poblado		Fina	Petrocálcica	s. inf.	12.92115	4.75
		s. inf.	s. inf.	s. inf.	1.5928	0.58

## I.7. Antecedentes

En la región de Actopan y zonas aledañas al municipio se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos y geoquímicos, entre otros. A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

La empresa Geocalli S.A. (1981) realizó el “**Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo.**” para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el cual, los objetivos del estudio fueron evaluar el potencial del acuífero, (...), determinar la calidad fisicoquímica del agua y definir zonas favorables para la explotación de agua subterránea. En este estudio se identificaron las fronteras del acuífero, se realizó un censo y se definió el esquema de flujo subterráneo. Concluye que existen unidades acuíferas, una somera localizada a profundidades que varían de 50 a 80 m, otra inferior a profundidad promedio de 300 m y una tercera alojada en calizas del Cretácico. (CONAGUA, 2015, pág. 4)

La empresa Estudios Geotécnicos (1981), publicó: “**Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Alfajayuca-Chapantongo-Actopan**” para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El objetivo de este estudio fue definir las estructuras y unidades hidrogeológicas con posibilidades de almacenar agua subterránea y localizar áreas favorables para la perforación de pozos exploratorios (CONAGUA, 2015, pág. 4).

La empresa Ariel, Consultores, S.A. (1991) realizó una “**Actualización del estudio geohidrológico de San Salvador y Valle de Actopan, con fines de determinar la disponibilidad hidrológica para el proyecto Xhoto, Hidalgo, así como para el aprovechamiento de agua potable**” para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo fue determinar la disponibilidad hidráulica para el proyecto Xhoto, Hgo., así como el aprovechamiento de agua potable. (CONAGUA, 2015, pág. 5)

Los autores Gallegos et al. (1999) publicaron “*The effects of wastewater irrigation on groundwater in Mexico*” [Los efectos de la irrigación de agua residual sobre la calidad del agua subterránea en México], en el estudio se menciona que:

En el Valle del Mezquital se llevó a cabo perforaciones a profundidades de 1.5 a 50 m bajo tierra en seis ubicaciones, una de ellas “6-Actopan”, las muestras fueron recolectadas y analizadas para bacterias indicadoras y patógenas, y los parámetros acorde con los métodos estándares (Métodos estándar, 1995): Total (TS), suspendido (SS) y sólidos disueltos (DS), (209, A, B, D, F), nitrógeno N03-N (418, C), N02-N (419), fósforo total y ortofosfatos (424, C, E), total y fecal coliformes (908, A, C) y patógenos bacterianos (*Salmonella*, *Shigella* and *Vibrio cholerae*) (912, A, B, G).

Los objetivos principales de este proyecto fueron para determinar si la bacteria fecal desde el agua residual son transportados a través de la subsuperficie, e investigar los efectos de la irrigación de agua residual sobre la calidad del agua subterránea.

En el estudio se concluyó que la irrigación de agua residual puede causar un impacto negativo sobre la calidad de agua subterránea en el Valle del Mezquital, también que las bacterias fecales de agua residual se transportan a través del subsuelo y a los acuíferos subyacentes, además de que el valle se encuentra contaminado por la concentración de estas bacterias durante la estación húmeda.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que toma en consideración la importancia de realizar un estudio hidrogeológico. Por lo que, sirve en parte en la utilización de datos, para poder realizar un propicio sustento de información en el recurso hídrico dentro del municipio.

Carrasco-Velázquez, Morales-Puente, Cienfuegos y Lozano-Santacruz (2004) publicaron la **“Geoquímica de las rocas asociadas al paleokarst cretácico en la plataforma de Actopan: evolución paleohidrológica”**. en el cual se menciona:

El paleokarst expuesto en las rocas cretácicas de la Plataforma de Actopan. El objetivo es explicar la evolución de la paleohidrología del paleokarst, a partir de estudios petrológicos de campo, de isótopos estables de carbono y oxígeno, elementos traza, incluyendo Sr, y elementos mayores como Mg, Mn y Fe, para conocer la posición estratigráfica de las zonas paleovadosa y paleofreática durante la evolución de su paleoacuífero y las rocas que lo cubrieron.

Se concluyó que en la Plataforma de Actopan fue posible conocer la evolución paleohidrológica del paleokarst en rocas de la Formación El Abra del Albiano-Cenomaniano, situando la zona paleovadosa y paleofreática, el contacto entre estas y la posición de la cubierta de rocas transgresivas.

Este trabajo se relaciona con el tema de investigación, ya que explica la evolución del acuífero en la zona de Actopan, y se tomará en consideración para explicar la relación que existe entre la disposición de las rocas cretácicas en el área de estudio.

La empresa Ariel Consultores, S.A. de C.V. (2004), publicó el, **“Estudio Técnico del Impacto por la explotación del agua subterránea de los acuíferos: Valle del Guadiana, Estado de Durango, Actopan-Santiago de Anaya y Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo”**, elaborado para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis del impacto de la explotación el agua subterránea en el acuífero del Actopan-Santiago de Anaya. Se identificaron los impactos ambientales y económicos derivados de la sobreexplotación del acuífero. El incremento del almacenamiento en el acuífero debido al uso

intensivo de agua residual en el riego agrícola provocó que la recarga sea mayor que las salidas de agua subterránea, hasta superar la capacidad del acuífero que vierte los excedentes en forma de manantiales y artesianismo [*sic*] en algunos pozos, así como flujo de agua subterránea en los drenes y salidas subterráneas. (CONAGUA, 2015, pág. 5)

CONAGUA (2015) publicó la “**Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Actopan-Santiago de Anaya (1313), Estado de Hidalgo**”, en la que refiere lo siguiente:

El acuífero se rige por los lineamientos de la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2000), que establece el método para determinar la disponibilidad media anual del agua nacional. La finalidad del estudio es la publicación de la disponibilidad hídrica. Se concluye una recarga total media anual de 208.1 hm<sup>3</sup>/año de los cuales 54.5 hm<sup>3</sup> son de recarga natural y 153.6 hm<sup>3</sup> de recarga inducida, la descarga natural inducida es de 90.0 hm<sup>3</sup> anuales, el volumen de agua subterránea concesionado es de 30,831,409 m<sup>3</sup> al año y la disponibilidad media de agua subterránea es de 87.268591 m<sup>3</sup>.

Este estudio se relaciona con el presente trabajo en una cuestión regional, por lo que, se tomará en consideración para establecer parámetros del nivel estático del agua, como su evolución hasta el año 2012.

La Secretaría de Gobernación (SEGOB, 2016) en el Diario Oficial de la Federación se publicó el “**Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas subterráneas del acuífero Actopan-Santiago de Anaya, clave 1313, en el Estado de Hidalgo, región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México**”, en el que se decretó veda por tiempo indefinido para el acuífero Actopan-Santiago de Anaya (1313), los resultados de este estudio son de los mencionados en CONAGUA (2015), y se concluyó que,

existe disponibilidad media anual para otorgar concesiones o asignaciones, sin embargo, todo en un manejo y control adecuado para prevenir la explotación del acuífero, además se recomendó suprimir la veda establecida decretada para la cuenca o Valle de México.

Este estudio es importante debido a que el gobierno establece las leyes adecuadas para que pueda suceder la anulación de la veda para el acuífero de Actopan-Santiago de Anaya (1313).

Un último estudio realizado por Islas García *et al.* (2017), publicaron el “**Análisis, observaciones y actualización del modelo conceptual del acuífero 1313 Actopan-Santiago de Anaya, Hidalgo**”, con la meta de representar las características, parámetros y el comportamiento hidrogeológico real y natural de una unidad hidrológica, basándose en un acopio de información de CONAGUA, analizando información integral hidrogeológica, con ello, se pudo concluir que el acuífero debe estar sujeto a una extracción, explotación, uso y aprovechamiento controlados para lograr la sustentabilidad ambiental y prevenir la explotación, ya que el acuífero no se encuentra en un estado de sobreexplotación, y se recomendó no aumentar los volúmenes de extracción sin la previa realización de un balance hidrológico.

Esto nos indica que es de vital importancia plantear un buen manejo y control del agua subterránea, y así, en la presente investigación retroalimentar las diversas cuestiones de los trabajos previamente mencionados.

## **I.8. Conceptos esenciales**

### **I.8.1. Hidrogeología.**

El término hidrogeología (en francés *hydrogéologie*) fue creado por primera vez por el biólogo y naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck en 1802, en una publicación con el mismo nombre en la ciudad de París por el Museo Natural de Historia (Lamarck, 1802). Lamarck

también introdujo el término biología. Aunque todo un campo científico y de ingeniería, que para su tema tuvo agua subterránea, debe su nombre al mismo científico francés (Kresic, 2006, pág. 3).

La hidrogeología puede ser considerada como una de las ciencias de la Tierra que ha ganado popularidad en los años recientes. Ocasionalmente ha habido confusión con respecto a la definición precisa de hidrogeología. Aunque el término hidrogeología fue utilizado en el siglo XIX, eso fue solo el comienzo del siglo XX que el científico Mead (1919) proporcionó el término a un significado más amplio. Él definió hidrogeología como “el estudio de la ocurrencia y movimiento del agua subterránea”. Meinzer (1923) utilizó el término geohidrología para describir un principio con el mismo fenómeno físico. (Nonner, 2003, pág. 1)

Otra definición más completa dada por Castany y Margat (1977; citado en Pulido Bosch, 2014, pág. 22) en su Diccionario Terminológico: *Hidrogeología es la ciencia de las aguas subterráneas comprendida en las ciencias de la Tierra que persigue el conocimiento de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y de las leyes físicas que rigen el origen, la presencia, los movimientos y las propiedades de las aguas subterráneas, sobre todo a su prospección, captación y protección.*

La hidrogeología es relacionada con otras ciencias; geología, hidrología, climatología, física, hidrogeoquímica, biología, entre otras. El conocimiento de estos temas es indispensable para el completo entendimiento del tema. Otra de las ciencias de la Tierra que necesita ser dominada por un hidrogeólogo es la geología, hidrología de agua superficial y meteorología. (Nonner, 2003, pág. 1)

### I.8.2. El agua.

La importancia del agua para la vida y, por lo tanto, la sociedad humana es bien conocida. La distribución de agua en el espacio y el tiempo es sumamente importante para asegurarla en la población humana. Aún más importante, para el uso humano son los flujos de agua entre los volúmenes de agua almacenados en la corteza terrestre y la atmósfera. Aunque gran parte se mueve continuamente, se podría tomar idealmente una imagen instantánea de la distribución de agua en el sistema terrestre (...) (véase Fig. I-7). (Montanari, s.f., párr. 1)

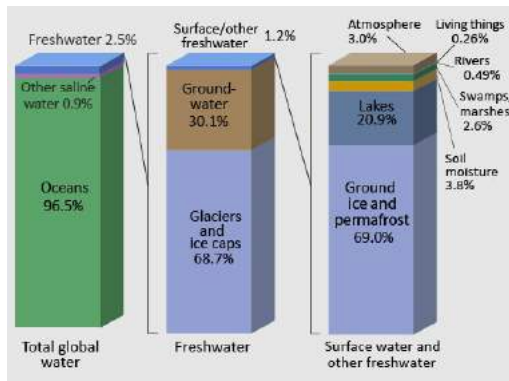


Figura I-7. Esquema de la distribución del agua en la Tierra. (página web oficial de la NASA, 1993; citado en Montanari, s.f.).

Pero ¿El agua siempre fue superficial o subterránea? A continuación, se presenta la teoría descrita de su origen.

#### I.8.2.1. Origen del agua.

Existen diversas teorías sobre el origen del

agua, de las cuales dos son fundamentalmente fuertes: La primera es la teoría volcánica dada a conocer por

primera vez por Desmarest (1771; citado en Richardson D.D., 1804), ya modificada con el paso del tiempo por varios científicos, menciona que el agua se formó en el centro de la Tierra por reacciones de altas temperaturas (527 °C) entre átomos de hidrógeno y oxígeno, algunas de las moléculas se expelieron hacia la superficie terrestre en forma de vapor, que pasó a formar parte de la atmósfera primitiva cuando la Tierra comenzaba a desgasificarse, se planteó que el agua ya estaba presente hace unos 3,800 millones de años.

La segunda, la teoría más actual trata de causas extraterrestres, que por numerosos meteoritos que contenían agua congelada al impactar en la Tierra, liberaron este compuesto y llenaron los océanos o al menos parte de ellos (Enciclopedia, 2012).



Pero, desde la teoría de la acreción propuesta por Otto Schmidt (1944; citado en Woolfson, 2000) sugirió un nuevo tipo de teoría unida para dos cuerpos en el espacio. Se sabe que existen nubes densas y frías en la galaxia por medio de la vista de grandes telescopios, Schmidt arguyó que una estrella donde atravesasen estas nubes adquirirá una envoltura de gas, él creía en consideraciones energéticas para dos cuerpos aislados, el material de un cuerpo no puede ser capturado por el otro, por lo que, introdujo un tercer cuerpo al modelo, otra estrella, para eliminar algo de energía, lo cual fue bastante inverosímil, después Littleton en 1961, demostró que el argumento de Schmidt era inválido.

Sin embargo, la acreción planetesimal es un hecho, en 1994 un cometa llamado Shoemaker-Levy9 (EcuRed, 2014) colisionó con Júpiter, creando un aumento en la cantidad de niebla en la estratósfera e incremento en la masa en el sistema de anillos.

En combinación con las teorías mencionadas se sugiere que:

En primer lugar el agua quizás fue transportada por las partículas planetesimales congeladas en el espacio exterior cuando comenzaba la formación de nuestro sistema solar, teniendo en cuenta la ley de la conservación de la materia-energía (Chaverri Benavides, 1992).

Posterior a ello, se sabe que la Tierra se formó hace aproximadamente 4,500 millones de años, y el agua se originó cuando la Tierra se encontraba en una etapa incandescente, ésta comenzó a enfriarse, teniendo reacciones fisicoquímicas que liberaban gases hacia el espacio exterior, además de la aportación de los impactos de meteoritos congelados, creando una atmósfera primitiva, teniendo en cuenta el lugar propicio de la Tierra hacia el sol en el espacio; entre los vapores, la mayor parte de la atmósfera primitiva era hidrógeno, muchos otros elementos y compuestos volátiles, entre estos, muy pequeñas cantidades de oxígeno, quizás debido al lento proceso de la diferenciación planetaria (separación de los elementos más pesados

que se concentran en el centro gravitacional y los menos densos ascienden), que posteriormente tendría lugar al origen del agua.

### ***I.8.2.2. Propiedades del agua.***

El agua es un líquido inusual debido a la manera en que unen sus moléculas. Un efecto de esta unión es su rara densidad. La mayoría de las sustancias químicas ocupan un espacio más pequeño – se hacen más densas – al enfriarse, pero el agua es más densa a 39.2 °F (4°C). Debajo de esta temperatura, su densidad es menor. El hielo a 32°F (0°C) es menos denso que el agua a 31°F; por eso flota en el agua. El agua usa una gran cantidad de calor para pasar del estado líquido a gaseoso y del sólido a líquido. La temperatura constante de la Tierra se mantiene sobre todo por las características del agua. Ésta también tiene una alta tensión en la superficie, que ayuda a formar gotas de lluvia en la atmósfera, y la capacidad de atravesar rocas y tierra. El agua disuelve varias sustancias con cierta facilidad. Su capacidad para lograrlo afecta la resistencia de las rocas que están a la intemperie, dado que algunos de los elementos químicos de éstas se disuelven durante la erosión (Rueda Gaxiola, *Apuntes de Geología Física II*, 2014).

### ***I.8.2.3. El ciclo del agua.***

El ciclo del agua no se inicia en un lugar específico, pero se asume que comenzó en los océanos. Como los hidrogeólogos franceses Perrault y Mariotte descubrieron, esta agua puede ser transportada de un ambiente a otro.

El proceso general se representa en la Figura I-8. El sol, que dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua. Las corrientes de viento acarrear el vapor a la atmósfera, donde la menor temperatura causa que se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre la Tierra, éstos compuesto colisionan, crecen y caen en forma de precipitación. Parte de esta precipitación cae en

forma de nieve, y se acumula en capas de hielo y en los glaciares, los cuales pueden almacenar agua congelada por millones de años (Ej., los lagos congelados; Elsworth, Whillans & Vostok [véase Fig. I-9]) (USGS, 2016).



Figura I-8. Diagrama del ciclo del agua, representando los procesos hídricos que conlleva (USGS, 2016).

En los climas más cálidos, la nieve acumulada se derrite y fluye como corriente de agua sobre el relieve terrestre por deshielo.

La mayor parte de la precipitación cae en los océanos o sobre los continentes, donde, debido a la gravedad, escurre sobre la superficie. Una parte de esta escorrentía alcanza los ríos en las depresiones del terreno; en la corriente de los ríos el agua se transporta de vuelta a los océanos. El agua de escorrentía y el agua subterránea que brota hacia la superficie se acumula y se mueve en los lagos de agua dulce y una parte se infiltra en el subsuelo, y una parte permanece

en los horizontes superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua y a los océanos como descarga de agua subterránea (USGS, 2016).

Otra parte del agua subterránea encuentra aperturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales de agua dulce. El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera. También el agua infiltrada alcanza las capas más profundas de suelo y recarga los acuíferos (roca superficial saturada), donde se mueven lentamente en grandes cantidades de agua dulce por largos períodos de tiempo. A lo largo, la porción de ella retornará a los océanos, donde el ciclo del agua volvería a comenzar nuevamente (USGS, 2016; Nonner, 2003).



Figura I-9. Representación de la localización de los antiguos lagos congelados de la Antártida. (Fox, 2014, pág. 246)

#### ***1.8.2.4. Zonas de agua en el subsuelo.***

De acuerdo con Kresic (2006) el agua en el subsuelo se divide en dos zonas principales: zona no saturada, también llamada zona vadosa o zona de aireación y zona saturada (véase Fig. I-10). El espacio poroso del suelo en la zona vadosa está lleno de aire y agua, en proporciones variables, dependiendo el tipo de suelo, condiciones climáticas y estacionales. Esta zona se subdivide, con respecto a la ocurrencia y circulación del agua; 1) zona edáfica o de

evapotranspiración, donde principalmente se encuentran las raíces de la flora, su espesor es de unos metros; 2) la zona higroscópica o intermedia, donde no está afectado por las raíces de la flora y el grado de compactación es mayor en las rocas o depósito de clastos; 3) y la franja capilar, que es una zona de transición a la zona saturada y su límite inferior es el nivel freático.

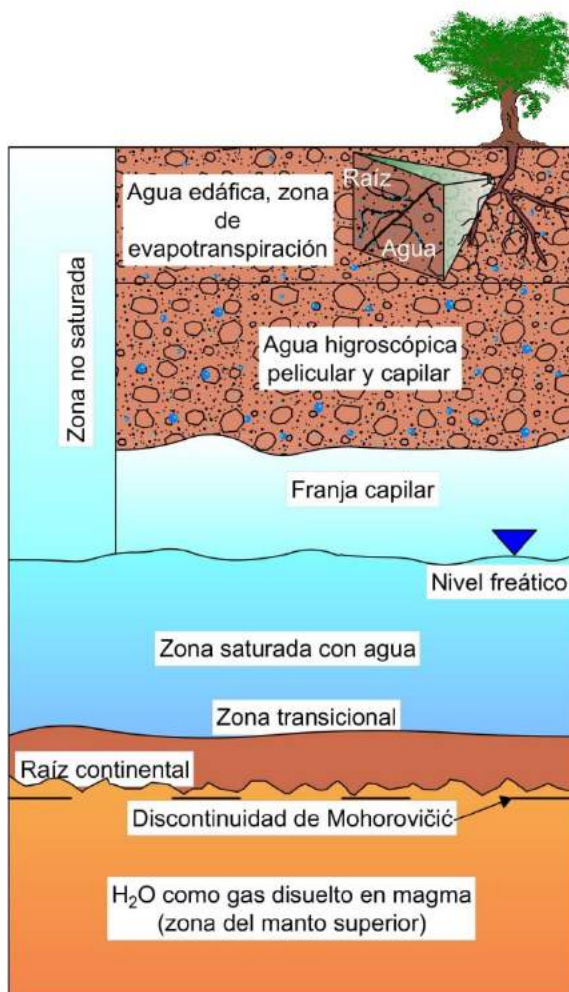


Figura I-10. Zonas hidrogeológicas y tipos de agua en el subsuelo. Elaboración propia basado en Kresic (2007, pág. 9).

La zona saturada se ubica por debajo del nivel freático, y existe una zona transicional donde el agua que ha sido desplazada a unos pocos kilómetros hacia la corteza continental puede seguir con su transporte o evaporarse por las altas temperaturas y mezclarse (Lutgens & Tarbuck, 2012) a través del magma llegando a la raíz continental y volver a ascender, aquí existe un



límite entre la roca y un punto de fusión conocido como discontinuidad de Mohorovičić a una profundidad de 70km, esta es variable dependiendo la localización geográfica.

En el manto superior o astenosfera existe magma (Griem, 2018), dependiendo de diversos factores, como la localización en donde predomine la presión sobre la temperatura o viceversa, las corrientes de convección (corriente que mueve el magma del manto terrestre), entre otros, por lo que, en algunas zonas se tienen una gran cantidad de gases (agua como gas disuelto, CO<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar<sub>2</sub>, etc.).

### **I.8.3. Porosidad.**

La porosidad es sólo el espacio ocupado por un líquido o gas entre el volumen total de un material, en este caso, la roca, y se representa con la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{V_P}{V_T}$$

Donde  $\phi$ , es la porosidad,  $V_P$  el volumen poroso y  $V_T$  el volumen total de la roca. La unidad que presenta la porosidad siempre es adimensional, sin embargo, es representada en un porcentaje. Por lo que, quedaría como la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{V_P}{V_T} (100 \%)$$

La porosidad se puede discretizar y dividirse en diferentes tipos de porosidad en relación con diversos factores como lo son: el flujo de corriente, el entrapamiento de la roca (formación rocosa), entre otras y sus subdivisiones. (Mendoza Romero, *Apuntes de Principios de la Petrofísica*, 2016)

La porosidad expresada como porcentaje, basada en cuatro enfoques comunes, puede ser expresada como (Lohman, 1972; citado en Kresic, 2006):

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_T} \Rightarrow \frac{V_w}{V_T} \Rightarrow \frac{V_T - V_m}{V_T} = 1 - \frac{V_m}{V_T} \times 100 \%$$

Donde  $V_m$ , es el volumen agregado de partículas minerales (sólidos) y  $V_w$ , es el volumen de agua en la muestra saturada.

La porosidad también puede ser expresada como:

$$\emptyset = \frac{\rho_m - \rho_d}{\rho_m} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m} (100 \%)$$

Donde  $\rho_m$ , es la densidad media de partículas minerales (densidad de grano) y  $\rho_d$ , es la densidad de la muestra seca (densidad aparente).

La porosidad es la propiedad más importante de las rocas que permite el almacenamiento [volumen de los huecos en las rocas] y movimiento del agua en el subsuelo. Influye directamente en la permeabilidad y la conductividad hidráulica de las rocas y, por tanto, la velocidad del agua subterránea y otros fluidos que pueden estar presentes. En general, la permeabilidad de las rocas y la velocidad del agua subterránea dependen de la forma, cantidad, distribución y la interconexión de poros. Los vacíos, por otro lado, dependen sobre los mecanismos de deposición de las rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas, y en otros varios procesos geológicos que afectan a todas las rocas durante y seguidamente de su formación. (Kresic, 2006, pág. 13)

#### ***1.8.3.5. Clasificación de la porosidad.***

Para una clasificación descriptiva se tiene:

- Porosidad Total: De acuerdo con los autores Archie (1952) & Sander (1967) (citado en Rodríguez, 2004), la porosidad – como propiedad física o volumen poroso – que posee una roca es el parámetro de todos los espacios vacíos de la roca. Y a considerar por su importancia las siguientes clases:
  - Muy baja: menor de 4%

- Baja: de 4 a 8% (valor medio alrededor de 6%)
  - Media: de 8 a 16% (valor medio alrededor de 10%)
  - Alta: de 16 a 32% (valor medio alrededor de 20%)
  - Muy alta: mayor de 32%
- Tamaño de los espacios vacíos: Bourbie et al., 1987 (citado en Rodríguez) habla que se puede considerar el segundo elemento de importancia en los espacios porosos. Es un parámetro difícil de tratar, debido a la continuidad y el carácter tridimensional del sistema poroso y su dependencia de la forma.
- Tamaño de los poros (Choquette & Pray, 1970; citado en Rodríguez), basada en la definida por Wentworth para los componentes detríticos:
    - Megaporos: poros mayores de 2mm (4mm según otros autores)
    - Mesoporos: poros de 2mm a 60 $\mu$ m
    - Microporos: poros < 60 $\mu$ m (10 a 1 $\mu$ m según otros autores)
  - Tamaño de los accesos de poro, a veces abusando del lenguaje y llamándolo gargantas o radio de poros:
    - Macroaccesos (macroporosidad): accesos mayores de 7,5 $\mu$ m
    - Microaccesos (microporosidad): accesos menores de 7,5 $\mu$ m
- Para una clasificación genética:
- Etapas (Kresic, 2006):
    - Primaria: Es la porosidad creada durante la formación de la roca misma, tales como espacios vacíos entre los granos de arena, espacios entre minerales en rocas duras (consolidadas) o planos de estratificación de rocas sedimentarias.



- Secundaria: Es creada después de la formación de la roca principalmente debido a, fuerzas tectónicas (fallamiento y plegamiento), que crea micro- y macrofisuras, fracturas, fallas y zonas de falla en rocas sólidas.

### **I.8.1. La ley de Darcy.**

El ingeniero francés Henry Darcy fue el primero en analizar cuantitativamente el flujo del agua, debido a su trabajo en la ciudad de *Dijon*, Francia, para el abastecimiento del agua en la ciudad. Se interesó en el flujo del agua en medios porosos, porque se utilizaban filtros de arena para depurar el agua y la observación de pozos que contribuían al mismo abastecimiento. En 1856 presentó un informe sobre el tema que incluía un pequeño apéndice, describiendo sus experimentos y la obtención de la ley. Ese pequeño anexo puede considerarse el nacimiento de la hidrogeología como ciencia, ha sido la base de todos los estudios fisicomatemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea. Hoy en día se utilizan aparatos muy similares a los que utilizó Darcy, llamados “permeámetros” (véase Fig. I-11), y han sido modificados con equipo moderno en los laboratorios hidrogeológicos. Darcy estableció la siguiente relación cuantitativa, conocida ahora como la ley de Darcy (Kresic, 2006; Sánchez San Roman, 2017):

$$Q = -K * A \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $K$  es la constante (permeabilidad),  $A$  es la sección transversal de la muestra (sedimento o roca),  $\Delta h$  es la diferencia de la elevación entre dos niveles diferentes del agua en un permeámetro,  $\Delta l$  es la distancia de la longitud de la muestra entre el flujo del agua.

Si sustituimos  $V$  para  $Q$  y usamos  $h$  para  $-\Delta h$ , la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$K = \frac{V\Delta l}{Ah}$$

## I.8.2. Conductividad hidráulica

Una roca permeable, con respecto al agua subterránea es aquella que tiene una textura que, permite el movimiento del agua libremente a través ésta, bajo la influencia de la gravedad y

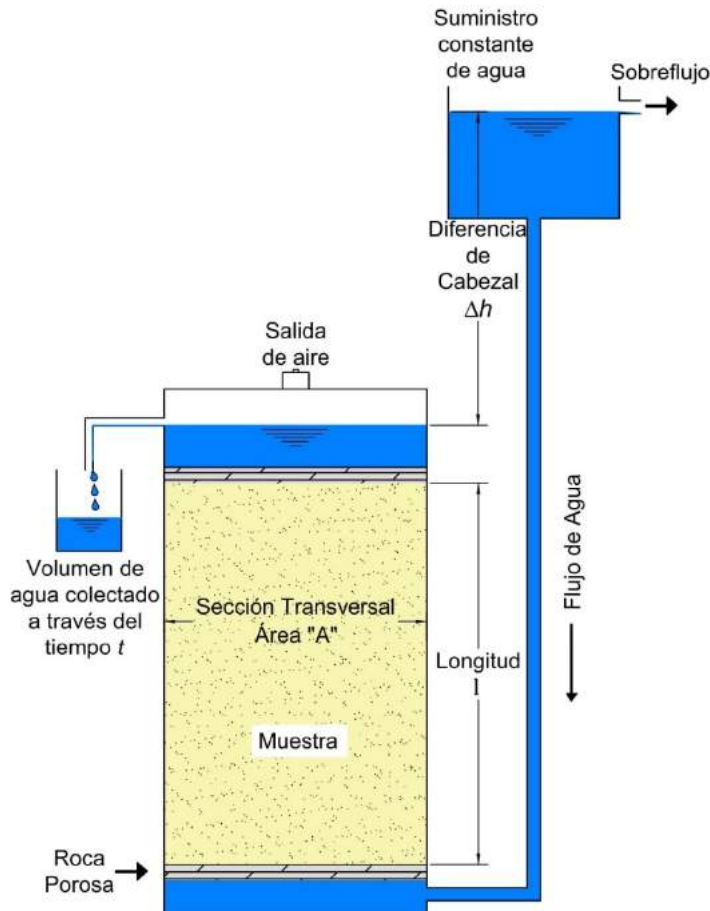


Figura I-11. Representación esquemática del permeámetro de cabezal constante utilizado para determinar la conductividad hidráulica de los sedimentos no consolidados. (Modificado de Kresic, 2006, pág. 34)

gradientes hidráulicos comúnmente encontrados en acuíferos. Tal roca tiene intersticios de comunicación (vacíos) de tamaño suficiente para permitir el flujo libre del agua subterránea. Por el otro lado, una roca impermeable, no permite el movimiento del agua bajo el cabezal o carga hidráulicos (la fuerza por unidad de área ejercida, por una columna de líquido a una altura por encima de una profundidad [y presión] de interés).

Tal roca puede tener intersticios de subcapilaridad o intersticios aislados de largo tamaño. Posiblemente tenga

pequeños intersticios capilares comunicantes. Una roca que es casi impermeable bajo condiciones comunes puede no ser impermeable al agua bajo un exceso de presión hidrostática a la que se encuentra en el subsuelo (Kresic, 2006; Schlumberger, 2017). También puede permitir que el agua se mueva a través del subsuelo bajo la influencia de otras fuerzas, tal como la atracción molecular. (Meinzer, 1923; citado en Kresic, 2006, pág. 33)

### I.8.3. Cabezal hidráulico.

De acuerdo con Kresic (2006) el principio del cabezal y el gradiente hidráulicos es ilustrado en la Figura I-12. En el fondo del pozo de monitoreo número 1, donde la pantalla del pozo está abierta a la zona saturada, la energía total ( $H$ ) o la fuerza impulsora del agua en ese punto del acuífero es:

$$H = z + h_p + \frac{V^2}{2g}$$

Donde  $z$  es la elevación sobre el *datum* (el significado de *datum* es usualmente el nivel del mar, pero podría ser cualquier referencia de nivel),  $h_p$  es la presión del cabezal debido a la presión del fluido (agua subterránea) por encima de ese punto,  $v$  es la velocidad del agua subterránea y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Como la velocidad del agua subterránea en la mayoría de los casos es muy baja, el tercer miembro del lado derecho puede ignorarse por razones prácticas y la ecuación se convierte en:

$$H = h = z + h_p$$

Donde  $h$  es el cabezal hidráulico, algunas veces llamado cabezal piezométrico o elevación de presión del agua. El cabezal de presión representa la presión del fluido ( $p$ ) de densidad constante ( $\rho$ ) en ese punto en el acuífero:

$$h_p = \frac{p}{\rho g}$$

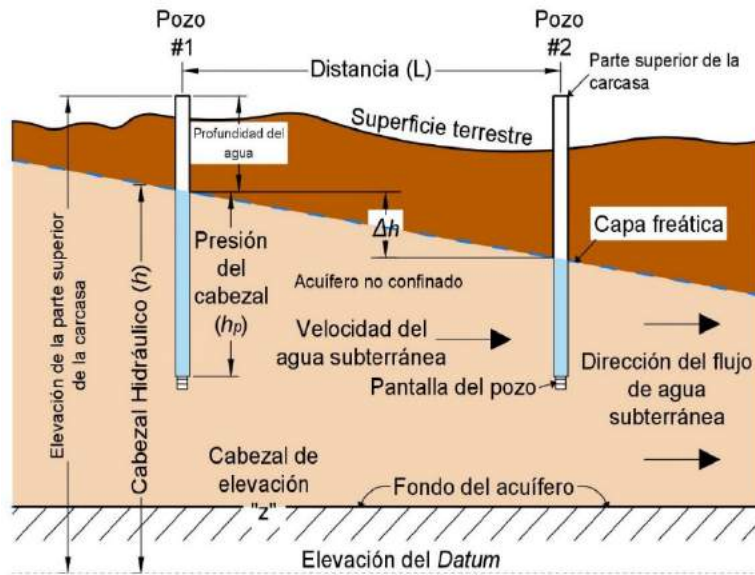


Figura I-12. Presentación esquemática de los elementos clave para determinar el cabezal y el gradiente hidráulicos en un acuífero no confinado [acuífero con rocas de muy baja permeabilidad]. Se tradujo y modificó de Kresic (2006, pág. 29).

### I.8.4. Flujo de agua subterránea.

El flujo de agua subterránea es el movimiento que tiene el agua inmediatamente cuando entra debajo de la superficie terrestre (véase Fig. I-13) y se distribuye a lo largo de todo el subsuelo rocoso (USGS, 2016) y siempre está en movimiento aun cuando tarde un

tiempo considerable para desplazarse. Por lo que, es imprescindible entender los siguientes

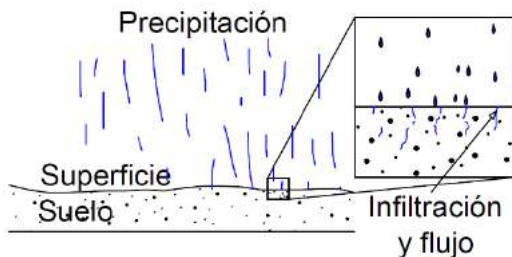


Figura I-13. Representación esquemática del flujo de agua subterránea en la precipitación del ciclo del agua. Elaboración propia.

conceptos para el flujo de agua subterránea:

#### I.8.4.6. El intemperismo y la migración de las sales solubles en el agua.

El movimiento, distribución, acumulación y ocurrencia del agua subterránea en la corteza terrestre y la variación de su salinidad, es una parte importante para este estudio.

De acuerdo con Chevotarev (1955) existe una relación de datos hacia la composición química del agua subterránea, teniendo en cuenta la migración coloidal de los elementos y compuestos químicos en el intemperismo; que es la desintegración, descomposición y sedimentación de los productos de la corteza terrestre, de una serie complicada de reacciones fisicoquímicas y biológicas incesantes en dicho ciclo (véase Fig. I-14) y tiene lugar a productos residuales y acumulativos (véase Tabla I-6). La transferencia y transformación de una sustancia

sólida hacia el estado de dispersión, puede tener lugar en un medio gaseoso o líquido, que conduce gradualmente a la ruptura de las moléculas en iones químicos.

Por cada kilogramo de agua marina, existe alrededor de 35 gramos de sales disueltas, como media, su densidad en la zona más superficial es de 1025 g/ml, siendo más densa que el

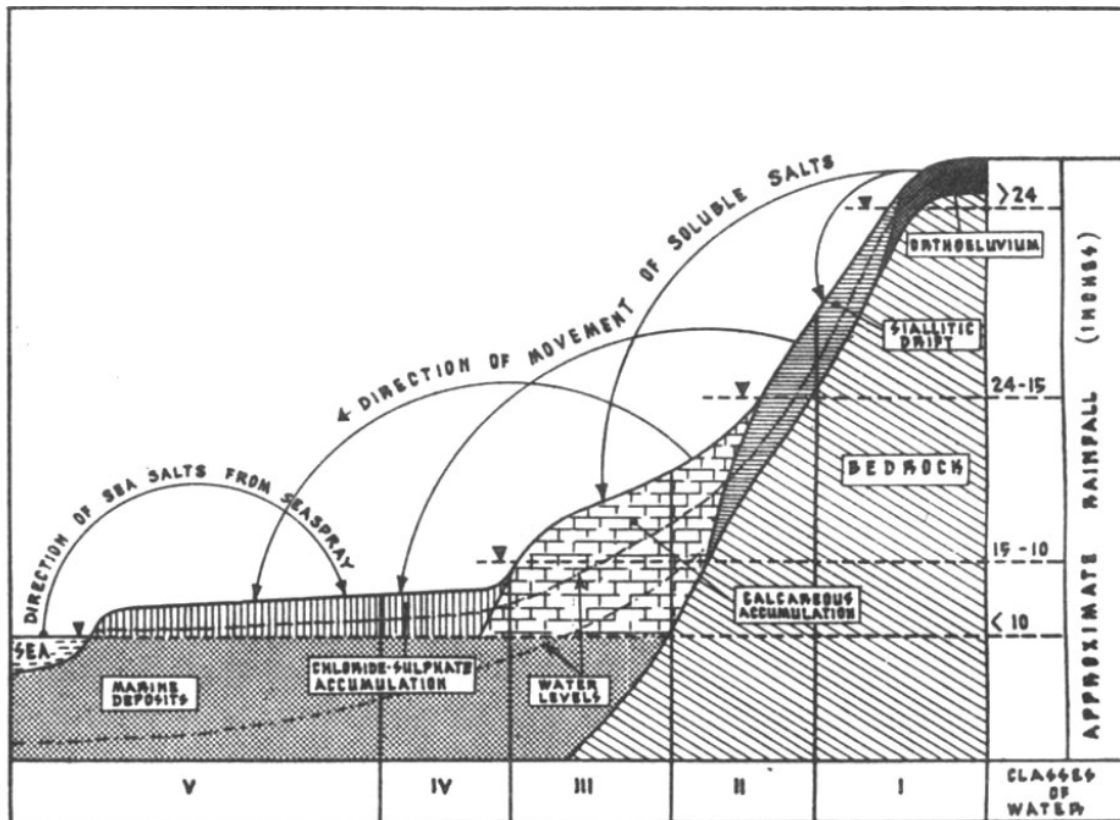


Figura I-14. Diagrama mostrando la relación del agua subterránea con la precipitación, condiciones de drenaje y el intemperismo. (Chevotarev, 1955, pág. 31)

agua dulce, como consecuencia, a mayor contenido en sal más bajo es su punto de congelación, y hasta 2/3 de los elementos químicos naturales están presentes en el mar, aunque la mayoría sea solo como trazas (cantidad minúscula de una sustancia), seis componentes, todos ellos iones son más del 99 % (véase Tabla I-7) de solutos (Wikipedia, 2019).

Tabla I-6. Ciclos y tipos de productos en el intemperismo (traducido de la modificación de Polinov, 1937; por y citado en Chevotarev, 1955, pág. 32)

Ciclos	Primer ciclo (orthoeluvium)		Segundo ciclo (paraeluvium)		Tercer ciclo (neoluvium)	
	Productos residuales	Productos acumulativos	Productos residuales	Productos acumulativos	Productos residuales	Productos acumulativos
Tipos de producto del intemperismo	1. Detritos gruesos	1. Cloruro-sulfato (principalment e aluvial)	1. Detritos	1. Cloruro-sulfato	1. Yeso en capas	1. Cloruro-sulfato
	2. Calcáreos (baja cubierta de vegetación)		2. Siálicos (supracalcáreos)	2. (a) Calcáreo (b) Cloruro-sulfato	2. Lixiviado supracalcáreo (siálico)	2. CaCO <sub>3</sub>
	3. Siálicos*		3. Alíticos (?)	3. (a) Siálicos, (b) Calcáreo, (c) Cloruro-sulfato	3. No saturado Siálico <sup>++</sup>	3. Aluminio y sistema de ferrosilicatos
	4. Alíticos <sup>†</sup>					
Tipos de roca	Ígneas (y altamente metamorfoseadas)		Rocas sedimentarias		Deriva reciente	

Marcas en el superíndice:

\*Una larga cantidad de sílice y muchos de sus componentes de sodio y calcio son removidos; los aluminosilicatos pasan gradualmente en ácidos residuales de aluminosilicatos, ej. ácidos del tipo del caolín.

†La acumulación de sesquióxidos a expensas de la lixiviación de los álcalis, tierras alcalinas y sílice.

<sup>++</sup>La acción del agua atmosférica carbonatada es insuficiente para reemplazar los iones absorbidos por hidrógeno.

Tabla I-7. Composición de solutos sólidos del agua de mar, cada uno expresado como porcentaje total (Wikipedia, 2019).

Aniones		Cationes	
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	55.29	Sodio (Na <sup>+</sup> )	30.75
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	7.75	Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	3.70
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.41	Calcio (Ca <sup>++</sup> )	1.18
Bromuro (Br <sup>-</sup> )	0.19	Potasio (K <sup>+</sup> )	1.14
Flúor (F <sup>-</sup> )	0.0037	Estroncio (Sr <sup>++</sup> )	0.022
Molécula no disociada		Ácido bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	0.076

#### ***I.8.4.7. Capacidad de migración de las sales solubles.***

Existen diversos elementos químicos en la corteza terrestre, se consideran que los siguientes forman las sales solubles (Chevotarev, 1955):

Cationes:

- Grupo A:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$
- Grupo B:  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Al}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$ , etc...

Aniones:

- Grupo A:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$
- Grupo B:  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SiO}_3^-$ , etc...

Donde el grupo “A” están constantemente presentes en el agua, a menudo en considerable cantidad, mientras que el grupo “B” su ocurrencia no es tan grande y se encuentra en pequeñas cantidades.

Goldschmid (1937; citado en Chevotarev, 1955) sugirió que el comportamiento químico de las soluciones acuosas pueden agruparse en base a su potencial iónico (valencia). Por lo que, cuando esta presente un bajo potencial iónico, éstas sustancias son producidas generalmente por el intemperismo y transporte, cuando se tiene un potencial iónico intermedio, éstos son precipitados por hidrólisis y se asocian con radicales hidroxilos desde solución acuosa, y un potencial iónico alto, forman aniones conteniendo oxígeno y nuevamente solubles para solución iónica. La capacidad de migración<sup>1</sup> de los iones en el gran ciclo del intemperismo se muestra en porcentaje de la Tabla I-8.

---

<sup>1</sup> Para ver toda la información acerca del intemperismo y las sales solubles en el agua subterránea, véase en Chevotarev (1955).

Tabla I-8. *Composición promedio de rocas ígneas y minerales residuales de agua oceánica y de río (traducido de Polinov, 1937; citado en Chevotarev, 1955, pág. 34)*

Elementos y compuestos	Composición promedio			Movilidad relativa de los elementos (columnas 2 y 3)*
	Rocas ígneas	Minerales residuales de		
		Agua de río	Agua oceánica	
1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	59.09 %	12.80 %	–	0.20 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.35 %	0.90 %	–	0.02 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.29 %	0.40 %	–	0.04 %
Ca	3.60 %	14.70 %	1.19 %	3.00 %
Mg	2.11 %	4.90 %	3.72 %	1.30 %
Na	2.97 %	9.50 %	30.59 %	2.40 %
K	2.57 %	4.40 %	1.10 %	1.25 %
Cl	0.05 %	6.75 %	55.29 %	100 %
SO <sub>4</sub>	0.15 %	11.60 %	7.69 %	57.00 %
CO <sub>3</sub>	–	36.50 %	0.20 %	–

\*Marca en el superíndice: Estas son las proporciones de porcentaje de contenido de Cl a cualquier otro ión y compuesto (I. Ch.).

Cabe mencionar que en el agua subterránea cuando es abundante y circula rápidamente en el intercambio activo con la superficie, su concentración salina es mucho menor que la que circula lentamente (Chevotarev, 1955). Es decir, rápida circulación menos concentración salina, lenta circulación más concentración salina (dependiendo el entorno geológico, topografía y clima).

#### ***1.8.4.8. Relación del flujo de agua subterránea con el medio geológico.***

El agua subterránea es capaz de interactuar con el entorno ambiental y la distribución espacial sistematizada de su flujo. Para ello, existen tres tipos de interacción; 1) Interacción química, con procesos de disolución, hidratación, hidrólisis, oxidación-reducción, ataques por ácidos, precipitación química, intercambio de base, reducción de sulfato, concentración y ultrafiltración u ósmosis; 2) Interacción física, con procesos de lubricación y modificación de la presión del poro; 3) Interacción cinética, con procesos en el transporte de agua, materia no acuosa y acuosa, y calor. El número y la diversidad del fenómeno natural por el agua subterránea son casi ilimitados, por componentes geológicos, la topografía y el clima (Tóth, 1999).



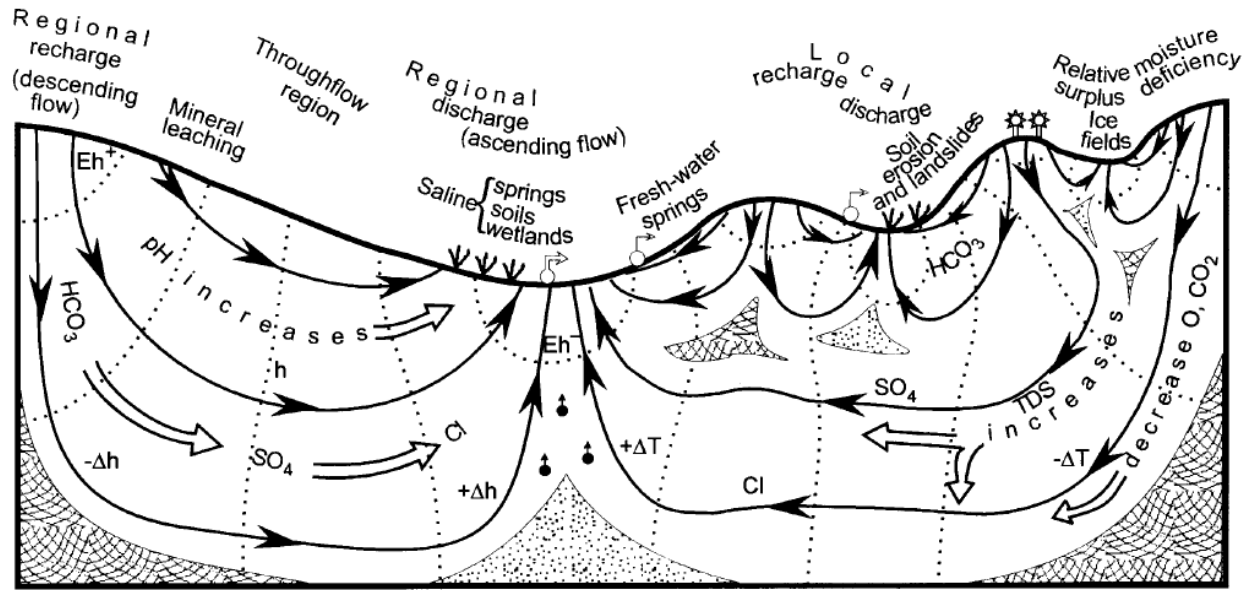
Se necesitó un período de esfuerzos conscientes en la década de 1960 para comprender el flujo de agua subterránea desde escalas pequeñas locales, regionales y basales. La Figura I-15<sup>2</sup> muestra un sistema de una cuenca idealizada con un único sistema de flujo, en el que se tiene cómo continuo o de transferencia en el área de recarga y de descarga. La mecánica del agua es indicada en la superficie desde la acción del cabezal hidráulico (presión ejercida en el agua, debido a la profundidad en la que se halla), son relativamente altas y disminuyen a medida que aumenta la profundidad; el flujo de agua es descendente y divergente (Tóth, 1999).

Por ello, se tienen diversas relaciones con el sistema de flujo de agua subterránea como:

- 1) la presión sub-, normal-, superhidrostática (en relación con la profundidad);
- 2) condiciones relativamente con el agua superficial intermitente y suelo húmedo (balance negativo de agua) en las áreas de recarga y agua excedente (balance positivo de agua) quizá de los humedales en área de descarga;
- 3) cambios sistemáticos en las facies de aniones de agua, desde  $\text{HCO}_3$  a través de  $\text{SO}_4$  a  $\text{Cl}$ , ambos a lo largo con la profundidad;
- 4) suelos químicamente lixiviados;
- 5) pantanos salinos;
- 6) anomalías positivas y negativas en el gradiente geotérmico;
- 7) condiciones químicamente oxidantes y reductoras;
- 8) tipo y calidad de la cubierta vegetal a las condiciones contrastantes de nutrientes y humedad generadas por la entrada y salida del agua subterránea en las extremidades del sistema de flujo;
- 9) vulnerabilidad en la superficie (intemperismo, originando deslizamientos, barrancos, etc.) en las áreas de descarga; y
- 10) acumulación de mineral transportado como materia en iones metálicos (uranio, sulfuros) hidrocarburos y contaminantes antropogénicos, principalmente en caminos de flujo convergente (trampas hidráulicas) (Tóth, 1999).

---

<sup>2</sup> Ver todos los procesos que conlleva en el medio geológico en Tóth (1999)



EXPLANATION

- Line of equal hydraulic head
  - Flow line
  - Spring: cold, warm
  - Phreatophytes
  - Xerophytes
  - Redox conditions:
    - $Eh^+$  oxidizing
    - $Eh^-$  reducing
  - Mineral (metallic, evaporite, hydrocarbon) traces above accumulations
- 
- Hydraulic heads:
    - $-\Delta h$  subhydrostatic
    - $h$  hydrostatic
    - $+\Delta h$  superhydrostatic
  - Hydraulic trap: convergence and accumulation of transported matter and heat
  - Quasi-stagnant zone: increased TDS
  - Geothermal temperature and gradient anomaly:
    - $+\Delta T$ ,  $-\Delta T$  positive, negative

Figura I-15. Efectos y manifestaciones del flujo impulsado por la gravedad en una cuenca de drenaje regionalmente no confinada. (modificada de Tóth, 1980; citado en Tóth, 1999, pág. 4)

**I.8.5. Sistema acuífero.**

Un sistema acuífero es el agua y el paso de ella a través de capas de rocas en el subsuelo, que contienen pequeños poros saturándolos parcial o casi totalmente. Estas rocas son permeables y generalmente son sedimentarias, tales como la arenisca y conglomerado, son ejemplos de este tipo de roca (NGO, 1996-2018).

Otra definición, de un acuífero fue definido por la *U. S. Geological Survey* (Lohman, 1988) como: “una formación, grupo de formaciones o parte de una formación que contiene

suficiente material permeable saturado para producir cantidades significativas de agua en pozos y manantiales”. (pág. 2)

Se enfatiza mucho que un acuífero no se puede dividir o limitar por las formaciones rocosas, ya que está compuesto de un sistema de flujo de agua subterránea, en el que desde sus estudios lo delimitaron debido a la aplicación para el uso humano, séase en la industria, actividades agropecuarias, consumo de agua potable, etc., que generó esta extravagante clasificación (acuicludo, acuitardo y acuífugo). En el concepto anteriormente del agua (Kresic, 2006; Lutgens & Tarbuck, 2012) y flujo de agua subterránea (Chevotarev, 1955; Tóth, 1999), se observó cómo es que ésta circula a través de las rocas o depósitos e inclusive se encuentra hasta el manto terrestre en forma de gases disueltos, y prácticamente es un conjunto cíclico que pasa en fases muy amplias y diversas en relación con el ciclo de las rocas.

#### ***1.8.5.9. La hidráulica y el sistema acuífero.***

En la historia de la humanidad, desde las antiguas civilizaciones han requerido manejar el agua, quizá desde Arquímedes (287 a. C. – 212 a. C.) (citado en Pedroza González, 2018) y la historia de la “Corona de Hierón”<sup>3</sup> para observar el comportamiento de este compuesto (agua) por un capricho del rey. En esta historia nos permite pensar acerca de la necesidad de un entendimiento comprensible acerca de la hidráulica con el agua.

Con todo esto, existe una relación de la hidráulica con el agua, pero en una cuestión del tipo de material, en este caso las formaciones rocosas, de las cuales algunas tienen una permeabilidad extremadamente baja, en la que se manejó como zonas o unidades confinantes de las que no transmiten cantidades significativas de agua, y las no confinantes o semiconfinantes (

---

<sup>3</sup> *Vér historia de la “Corona de Hierón” en Pedroza González (2018, pp. 11 y 12)*

que tienen un pequeño retraso en el movimiento de agua) que no están sobre estratos de roca de permeabilidad excesivamente baja (Maliva, 2016).

### **I.8.6. Transmisividad.**

La transmisividad es el producto de dos parámetros relacionados con el espesor de la formación y el agua subterránea, que son: el gradiente hidráulico por el espesor y se mide en área sobre tiempo, ejemplo,  $150 \text{ m}^2/\text{día}$ . Este parámetro es variable dependiendo el tipo de acuíferos [el tipo de roca con relación hidráulica] hidráulico (...). (Sánchez San Roman, 2017, pág. 10)

### **I.8.7. Volumen de agua en movimiento.**

Se sugiere el término “volumen de agua en movimiento” ( $S$ ), antes definido como almacenamiento [al origen de su palabra refiere a cosas para guardar o depositar, sin embargo, tiene un límite, por lo que indica que el agua subterránea se puede acabar] como la cantidad de agua en movimiento que libera desde un área unitaria en el acuífero (ejemplo,  $1 \text{ m}^2$ ) bajo una disminución de unidad (ejemplo,  $1 \text{ m}$ ) del cabezal hidráulico. Por tanto, es un parámetro adimensional. El volumen de agua en movimiento específico ( $S_s$ ) es definido como la cantidad de agua que es liberado de una unidad volumétrica del acuífero bajo una disminución de la unidad del cabezal hidráulico entre el espesor de la formación rocosa, y tiene las unidades de la longitud recíproca (ejemplo,  $\text{m}^{-1}$ ). La capacidad de “ $S$ ” de un acuífero donde el agua pasa muy lentamente es el valor “ $S_s$ ” integrado verticalmente que, para un acuífero homogéneo, que es el producto de su “ $S_s$ ” y el espesor del acuífero ( $b$ ) (Maliva, 2016).

$$S = S_s b$$

El  $S$  de un acuífero donde no hay estratos de roca con permeabilidades extremadamente bajos es aproximadamente igual al rendimiento específico ( $S_y$ ), que es la cantidad de agua que drenará gravitacionalmente de un área transversal de la unidad de un acuífero por unidad de

cambio en la presión de elevación de agua. El agua, que es demorada o tardada en un acuífero (ejemplo, no se drena fácilmente) es referida como un retardo específico ( $S_r$ ). La suma del rendimiento y retardo específico es el total de la porosidad de la roca o sedimento. El agua liberada del “S” extremadamente lento por bombeo es producida por una combinación de compactación del acuífero y expansión del agua, ambas inducidas por una disminución en la presión del agua intersticial del acuífero. Los valores para volúmenes de agua en movimiento medio o aplazado también referidos como sus coeficientes, y son usualmente órdenes de menor magnitud que los rendimientos específicos de la misma roca o tipos de sedimentos (Maliva, 2016).

#### **I.8.8. Estudio hidrogeológico.**

Para comenzar, se define un estudio hidrogeológico como, un documento exigido por los diferentes organismos gubernamentales (ej. SEMARNAT, CONAGUA) que dirigen los recursos hídricos para un bienestar común en el que analiza las características hidrogeológicas del medio físico en actividades socioeconómicas como construcciones, perforación de pozos, control y manejo del agua subterránea, captación del agua, etc. (Certicalia, 2019).

Estos estudios se realizan debido a la relación que existe con el hombre y nuestro recurso natural (el agua) para su bienestar, haciéndose necesario para la evaluación de la contaminación, abastecimiento, uso y control, sobreexplotación y sus relaciones con el ser humano, y de acuerdo con esto, se tienen características principales que debe de llevar un estudio hidrogeológico, cuales son:

- **Compilación de la información:** Gestión del tiempo y costes de realización, acceso a datos geológicos históricos, estudio de la demanda acuática, aproximación de demandas actuales y futuras, previsión de crecimiento de población.

- Estudio geológico: Reconocimiento del terreno, hipótesis sobre localización y seguimiento del movimiento de agua subterránea, comprobaciones y trabajo de campo.
- Estudio geofísico: Métodos eléctricos y electromagnéticos, métodos sísmicos, resonancias magnéticas para el sondeo.
- Estudio del clima: Precipitaciones, evaporación, infiltraciones de vertidos o sedimentos, escorrentía (Certicalia, 2019, párr. 6).

#### ***1.8.8.10. Modelo conceptual hidrogeológico.***

Acorde al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDAEM, 2014) menciona que: Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar (cantidad de agua en movimiento) y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo del agua subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica del agua subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada. (párr. 1)

Continuando con el IDAEM (2019), se describen los componentes de un modelo hidrogeológico conceptual:

- Modelo Geológico Básico: Descripción geológica, unidades geológicas, unidades hidrogeológicas, corte hidrogeológico, mapa geológico, mapa hidrogeológico,
- Modelo hidrológico: Precipitación, ETP, infiltración, recarga (zonas, valor), condiciones de flujo, inventario puntos de agua.
- Características hidráulicas: K, S, T, tipos de acuíferos, caudales de explotación, características de las captaciones.
- Uso del agua subterránea: uso por sectores (estadísticas), fuentes abastecedoras de acueductos.
- Características fisicoquímicas del agua: Tipo de agua.
- Afectaciones por actividad antrópicas: Actividades económicas, fuentes de contaminación (IDAEM, 2014).

#### ***1.8.8.11. Planificación del agua subterránea.***

Para poder tener una planificación hídrica se tiene que entender la relación que existe entre el agua superficial y subterránea, así como el entorno físico que lo rodea interrelacionado con el ser humano. Cada situación hidrogeológica es diferente, por lo cual se toman diversos enfoques del sistema acuífero, y de los diferentes sectores en la que se distribuye (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad), además de que también se consideran los marcos legales e instituciones débiles para poder integrar todos los estudios relacionados y se pueda obtener una solución (Garduño et al., 2006). Por lo tanto, para planificar el abastecimiento de agua subterránea se debe tener presente las características de la siguiente tabla:

Tabla I-9. *Planificación del abastecimiento de agua. Modificado de Garduño et al. (2006)*

<b>Agua subterránea y servicios esperados del acuífero</b>	<b>Evaluación del recurso</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Describir la hidrogeología local en el contexto regional con mapas simplificados y perfiles representativos (modelos conceptuales 2D y 3D).</li><li>• Calcular los balances de agua en el acuífero incluyendo las interacciones con el agua superficial.</li><li>• Evaluar la incertidumbre hidrogeológica y las tendencias históricas del agua subterránea.</li><li>• Evaluar los subsidios o políticas (sobre pozos y cultivos) que afecten la extracción del agua subterránea.</li></ul>
	<b>Aspectos de calidad del agua</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Compilar información acerca de la evaluación de variaciones naturales de la calidad del agua subterránea, también evidencias o posibles causas de contaminación.</li></ul>
<b>Mecanismos actuales de gestión</b>	<b>Arreglos institucionales</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Sugerencias para el agua en el marco legal y sistema de permisos de agua.</li><li>• Identificar criterios y prioridades para asignar el agua.</li></ul>
	<b>Asignación y uso del agua</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Resumir la situación actual mediante gráficas sectoriales en el uso del agua.</li><li>• Establecer un perfil adecuado para la cantidad de uso en los sectores.</li></ul>
	<b>Opciones futuras</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Con tablas y gráficas estimar los gastos del uso del agua.</li></ul>

Si no se tiene una planificación del agua, generan circunstancias negativas en su aprovechamiento en el sistema acuífero. De acuerdo con Dávila Pórcel y León Gómez (2011), mencionan las siguientes consecuencias:

- Extracción excesiva de acuíferos. Que es la explotación de A. Sub. en zonas urbanas y depende de la disponibilidad en los acuíferos. En el que su medio geológico es importante, debido a que las formaciones geológicas transportan y almacenan A. Sub.
- Fluctuaciones de los niveles del A. Sub. Que es el descenso del nivel freático, consecuente de una extracción excesiva del acuífero y cambiando la distribución de la carga hidráulica dentro del sistema acuífero.
- Subsistencia del terreno. La continua y excesiva extracción del acuífero puede llevar a la subsistencia del terreno que causa importantes pérdidas económicas. Este problema se





presenta en depósitos de sedimentos recientemente arcillosos, a causa de la disminución de la presión intersticial o bien colapsos locales si hay cavidades kársticas o sifonamiento y arrastre de arenas.

- Intrusión de agua salina. A medida que el nivel freático baja puede invertirse la dirección de flujo subterráneo y la interfase entre el acuífero y el agua salina, lo cual permite el avance de agua salobre tierra adentro.

## Capítulo II. Marco geológico

El siguiente capítulo se divide en dos partes; la geología regional y local. En la primera se describen las características generales, delimitando el área territorial, mostrando las provincias fisiográficas y la estratigrafía de la cual se compone, esto es de gran importancia para generar un carácter particular. En la segunda parte se detallan los rasgos en una escala a nivel local, representada en mapas, de igual manera, una descripción más minuciosa de la estratigrafía dentro del área de estudio, así como también se menciona la geología estructural. Y se presenta en el apartado de anexos (Mapa 1) la carta geológica local.

## II.1. Geología regional

Se presenta la geología del Estado de Hidalgo haciéndose énfasis en la carta geológico-minera (clave: F14-11) por SGM (1997). El siguiente estudio realizado por el INEGI y el Gobierno del Estado de Hidalgo (2004) expresan que:

Las características litológicas y estructurales de las rocas que afloran en las provincias fisiográficas que cubren el Estado de Hidalgo, indican que hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico, que asociados a una actividad volcánica y al relleno de cuencas que alguna vez fueron océanos, dieron el particular carácter estructural que muestra hoy esta entidad. Este estado es el único lugar del país en donde mejor se puede apreciar el complejo desarrollo geológico que ha experimentado todo el territorio nacional, ya que en la provincia de la Sierra Madre Oriental afloran las rocas más antiguas de México correspondientes al período [i.e. supereón] Precámbrico y junto con éste, una serie completa de las unidades estratigráficas que se conocen, ya que abarcan el Paleozoico Superior, todo el Mesozoico y el Cenozoico. La continuidad de los fenómenos volcánicos que ocurrieron en territorio hidalguense durante casi todo el periodo [sic] terciario se manifiesta en el gran espesor y en [sic] la extensión que cubren las rocas ígneas del Eje Neovolcánico. Estas estructuras han sido modificadas en ocasiones por fenómenos de vulcanismo explosivo, como se manifiesta en "La Caldera" de Huichapan, en la localidad El Astillero. Son de llamar la atención los sedimentos marinos que se encuentran en la porción noreste de Hidalgo, ya que están genéticamente relacionados con la formación de la Llanura Costera del Golfo, debido a ello, no sorprende el continuo hallazgo de fósiles y restos de especies marinas en la porción central de la entidad. La provincia de la Sierra Madre Oriental abarca el mayor porcentaje del territorio hidalguense y está constituido principalmente por rocas

sedimentarias, continentales y marinas; consideradas como las rocas más antiguas que se conocen en el país con edades hasta de 1,000 millones de años. (pp. 23 y 24)

En base a INEGI (2018), se presenta el Estado de Hidalgo como la parte regional del área de estudio, situándose en la porción centro-sur de la República Mexicana. Cuenta con una superficie de 20,905.12 km<sup>2</sup> y colinda al norte con el Estado de San Luis Potosí, al sur con los estados de México y Tlaxcala, al este con los estados de Veracruz y Puebla y finalmente al oeste con el estado de Querétaro.

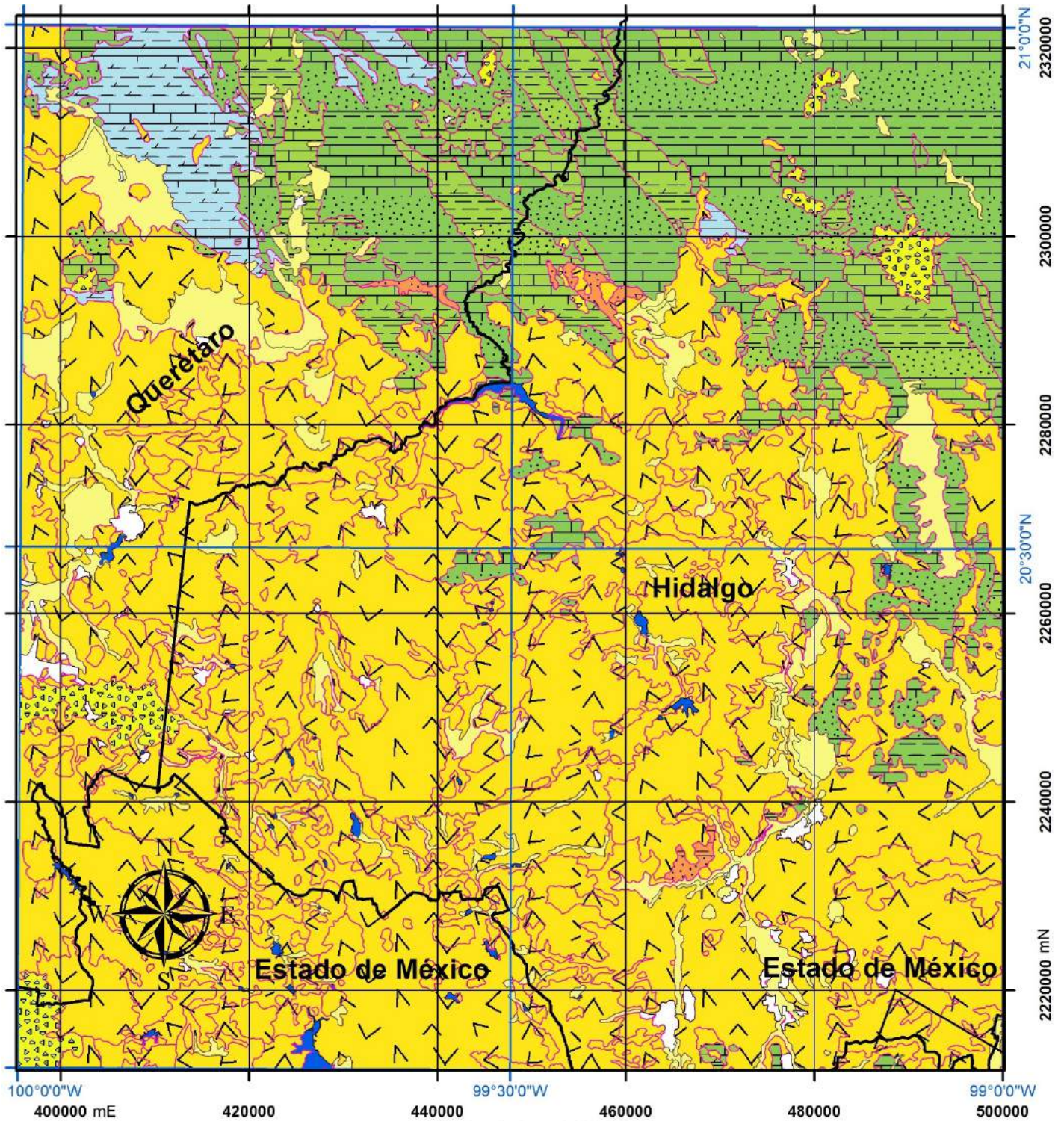
### **II.1.1. Estratigrafía.**

Se considera la geología (véase Fig. II-1A y B) de INEGI (s.f) de las unidades litoestratigráficas que se presentan posteriormente, utilizando el código de colores de acuerdo con el mapa geológico del mundo (CGMW; Pellé, 2012), además de la simbología personalizada en base a USGS – *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization (2016). También las columnas geológicas hechas a partir de los autores del tema de estratigrafía. Dentro de las coordenadas, porciones: Izquierda 395389.21 m E, inferior 2211349.75 m N, superior 2322335.50 m N y derecha 604610.93 m E, cuya clave cartográfica es F14-11, en un sistema de proyección UTM. (SGM, 1997)

Se presenta y enfatiza las unidades estratigráficas de mayor relevancia de la geología de Pachuca, Hidalgo (SGM, 1997), así como las columnas estratigráficas (véase, Fig. II-2 y II-3) en base a los autores descritos del presente tema.

*Figura II-1.* Mapa geológico regional, generalizando las unidades litológicas presentes en la carta geológico-minera de Pachuca, Hidalgo, se dividió en; A) Parte Oeste de la carta; B) Parte Este. Elaboración propia y modificado de la base de datos de INEGI (s.f.)







**Simbología**

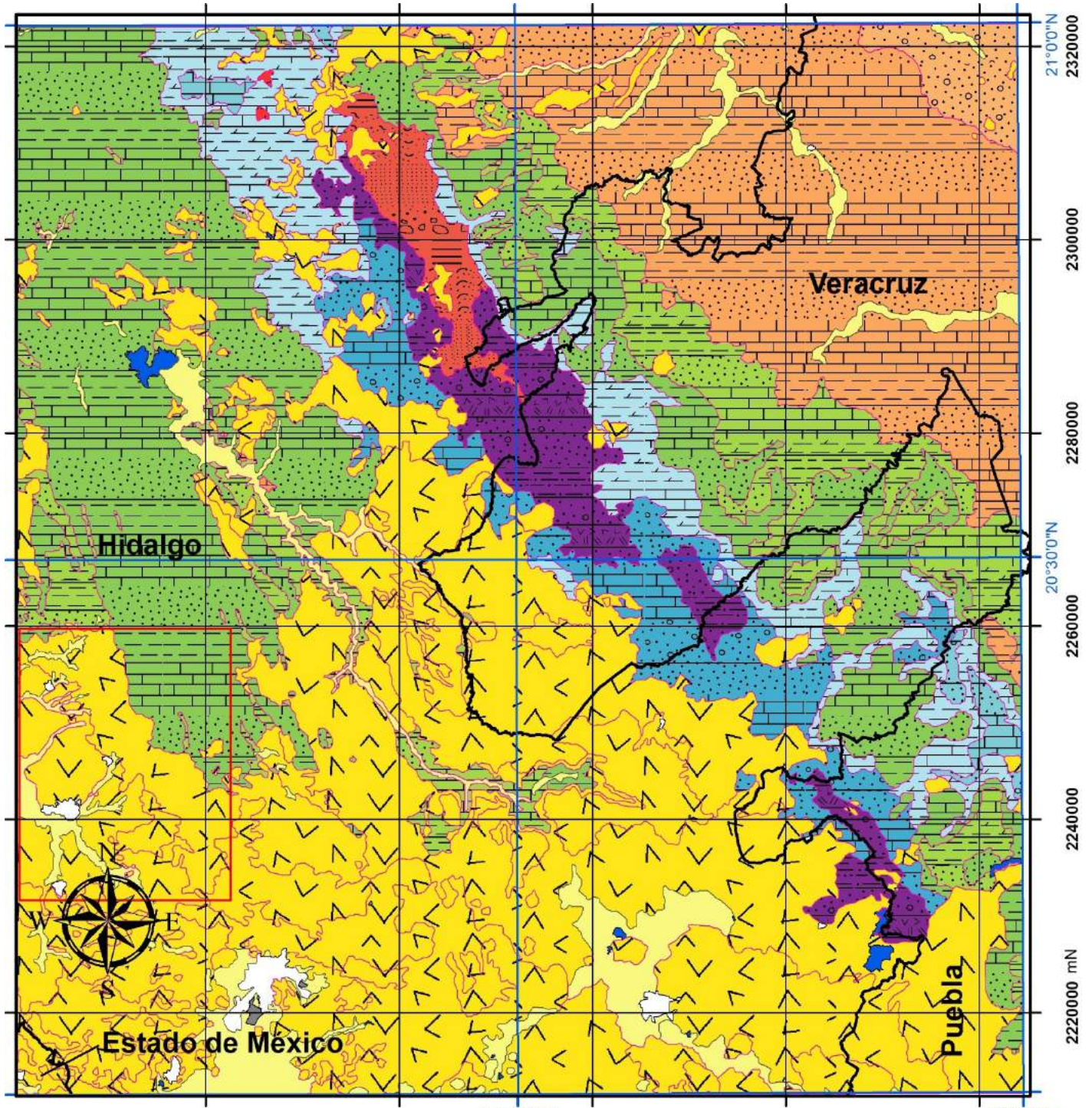
-  Límite del área de estudio
-  División Política Estatal
-  Jales mineros
-  Cuerpos de agua perenne
-  S. Inf.

Escala absoluta: 1:600,000

**Edad de las rocas**

-  Cuaternario
-  Cenozoico (Neógeno)
-  Cenozoico (Paleógeno, Eoceno)
-  Cenozoico (Paleógeno, Paleoceno)
-  Cenozoico (Paleógeno)
-  Cenozoico
-  Cretácico Superior
-  Cretácico Inferior





**Simbología**

- |  |                   |  |                                   |
|--|-------------------|--|-----------------------------------|
|  | Jurásico Superior |  | Paleozoico (Pérmico, Cisuraliano) |
|  | Jurásico Medio    |  | Proterozoico                      |
|  | Jurásico Inferior |  |                                   |
|  | Triásico          |  |                                   |

Escala absoluta: 1:600,000

**Escala gráfica:**



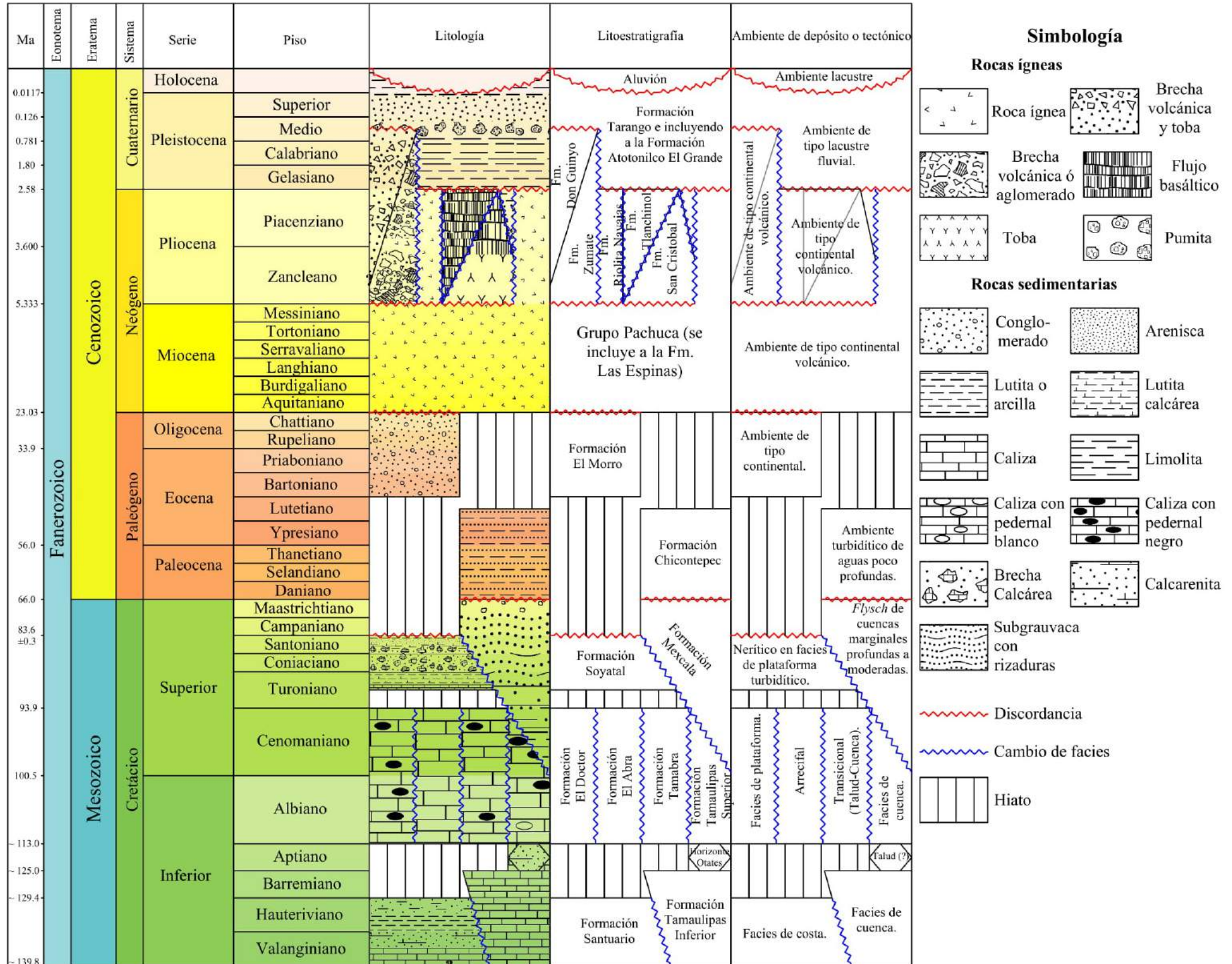
**B**



**II.1.1.12. Proterozoico**

Tabla II-1. *Características del Gneis Huiznopala. Elaboración propia, basado en autores (Ochoa-Camarillo, Buitrón-Sánchez, & Silva-Pineda, 1999<sup>1</sup>; Mendoza Espinoza et al., 2009<sup>4</sup>; Lawlor et al., 1999<sup>2</sup>; Verde Ramírez, 2009<sup>3</sup>).*

Eonotema	Formación	Definición	Litología	Distribución	Relaciones estratigráficas y edad	Correlación
<p><b>Proterozoico</b></p>	<p>Gneis Huiznopala</p>	<p>Von Kuegelgen (1958) descubrió rocas metamórficas en el anticlinorio de Huayacocotla y se refirió a ella como “ basamento cristalino” , sin asignar ninguna edad. El nombre Gneis Huiznopala fue propuesto por Fries y Rincón-Orta (1965) quién lo atribuyó al supereón Precámbrico<sup>4</sup>.</p>	<p>El gneis Huiznopala se conforma de tres unidades litológicas: La primera unidad se compone de una secuencia de Paragneises, de tipo feldespático de gris claro, gneises granatíferos y gneises calco-sílicos; la segunda son, metanortositas andesíticas y gneises gabroides leucocráticos y melanocráticos; y la última compuesta por rocas de metatonalita, ortogneises intermedios / charnockita<sup>2</sup>.</p>	<p>El gneis Huiznopala se encuentra debajo de una cubierta sedimentaria de rocas pérmicas, jurásicas volcánicas y sedimentarias en seis áreas separadas; localidades de Molango, Chapula, Huiznopala, Otongo, Chipoco y Totonicapca, del Estado de Hidalgo, dentro del centro-oeste de Huizachal, los ríos Pilapa y Agua Salada se distribuyen ortogneises /charnockita y una secuencia de paragneises<sup>2</sup>. (pág. 75)</p>	<p>El gneis Huiznopala subyace discordantemente por la Formación Santiago, en la región Huiznopala y por las formaciones Huayacocotla y Pimienta en la región de Molango, Hidalgo, y hacia Otamalacatla, subyace con rocas de edad paleozoica<sup>3</sup>. Con muestras para edades de zircones (U-Pb) se encuentra restringido en un rango de ~200 Ma, la etapa más temprana fue un arco magmático que se extendió desde ~1200 – 1150 Ma, y una segunda etapa que incluye las facies metamórficas granulíticas y emplazamientos de complejo de gabro-anortositas de 1000 Ma, y pegmatitas con edad de 938±3 Ma<sup>2</sup>.</p>	<p>Se correlaciona con el Gneis Novillo, de la región de Ciudad Victoria, Tamaulipas y ambos se consideran parte del basamento del bloque Oaxaquia<sup>3,4</sup>.</p>





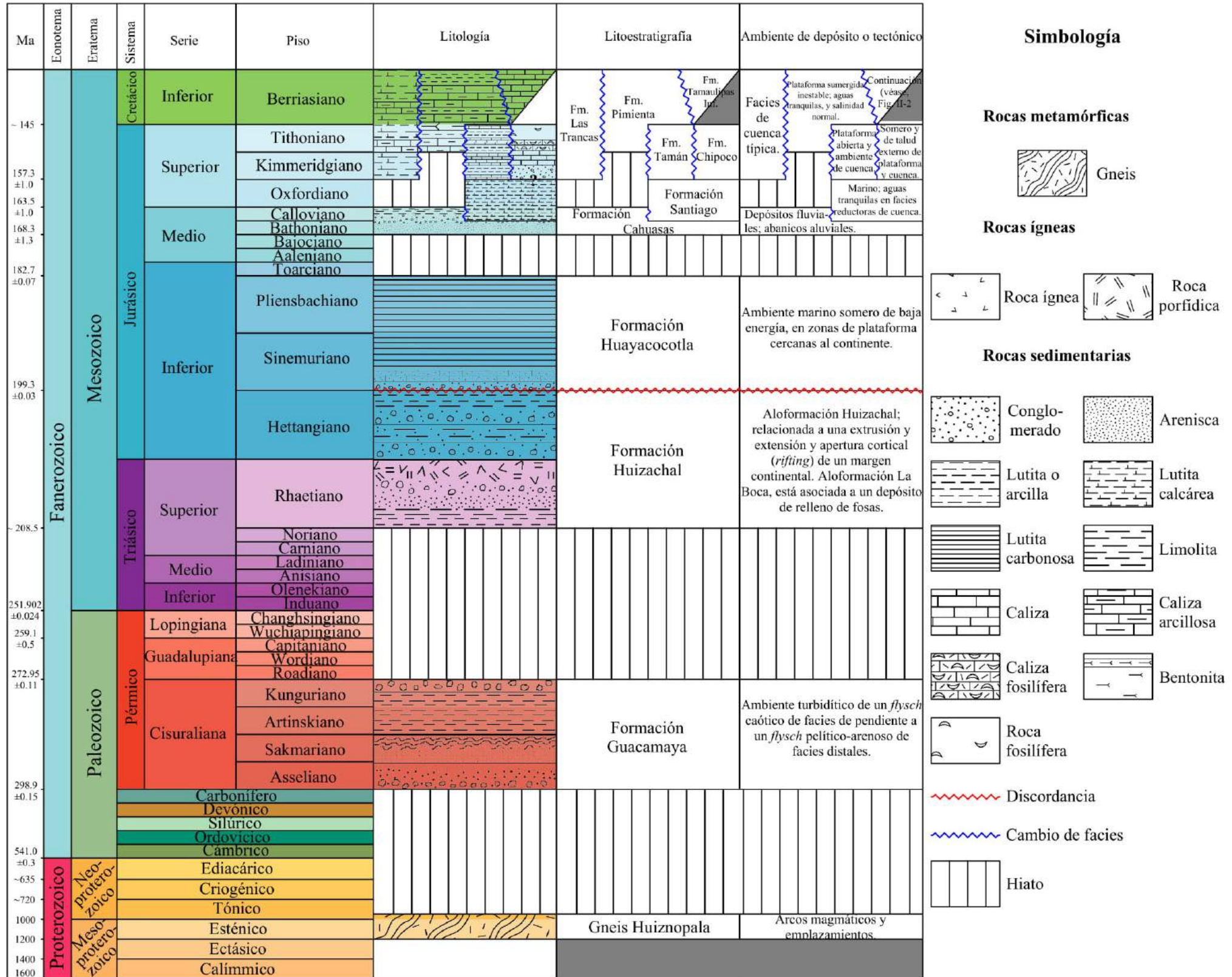


Figura II-3. Columna geológica del eratema Meso-Neoproterozoico, Paleozoico y Mesozoico de Pachuca, Hidalgo (SGM, 1997). Elaboración propia basado en los posteriores autores de la sección de estratigrafía.

**II.1.1.13. Paleozoico.**

Tabla II-2. Características de la Formación Guacamaya. Elaboración propia basado en autores (Carrillo Bravo, 1961<sup>1</sup>; Arellano Gil, Vachard, Yussim y de Dios González, 1998<sup>2</sup>; Palma Ramírez, 2015<sup>3</sup>).

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
Paleozoico	Guacamaya	Carrillo Bravo (1961) asigna el nombre como la Formación Guacamaya a una gran secuencia rítmica de sedimentos de edad Leonard y Wolfcamp (correspondiente a la serie Cisuraliana), constituida por areniscas, conglomerados y lutitas de color gris oscuro, negro y gris verdoso que afloran en el Anticlinalorio Huizachal-Peregrina.	“ Las rocas de la Formación Guacamaya están expuestas en los siguientes cañones: Peregrina, Caballeros, Arroyo Seco, Santa Lugarda, La Boca y El Olmo” <sup>1</sup> (pág. 26).	Se expresa que: la Formación Guacamaya presenta numerosas unidades turbidíticas con secuencias Bouma completas; estratificación graduada del miembro A; laminaciones paralelas y <i>ripples</i> de los miembros B, C y D; intercalaciones arcillosas del miembro E (...). Hay algunos conglomerados finos (corrientes de lodo) con fragmentos de crinoides y conglomerados gruesos (debritas) con gravas y bloques de rocas caláreas de hasta 2.0 m que contienen, frecuentemente, fusilínidos y crinoides <sup>2</sup> . (pág. 10). Se señala en un informe inédito por el Instituto Mexicano del Petróleo que el espesor de la unidad se desconoce, sin embargo, Carrillo Bravo (1959) fija un espesor de más de 1,000 m y Stewart et al. (1999) en el cañón de La Peregrina de 1,260 m <sup>3</sup> .	Estas rocas sobreyacen en discordancia angular al Gneis Huiznopala (Sour-Tovar, 1999) y también discordantemente cubre a las formaciones Zuloaga (Carrillo-Bravo, 1961), y La Joya (Carrillo-Bravo, 1961; Stewart et al., 1999), subyace en discordancia angular a la Formación Huizachal de edad Triásico-Jurásico (Carrillo-Bravo, 1961; Pérez-Ramos, 1978; Ramírez-Ramírez, 1992; Sour Tovar, 1999; Stewart et al., 1999) <sup>3</sup> . (pág. 2)	Flawn y Díaz (1959), Carrillo-Bravo (1961), Ramírez-Ramírez (1992), Malpica y De la Torre (1980), indican una edad correspondiente a la serie Cisuraliana, (...), se correlacionan los estratos marinos y fosilíferos de la Formación Guacamaya con los reportados para la zona frontal de Marathon, área de Ouachita en el oeste de Texas; sin embargo, Stewart (1988) menciona que existen diferencias litológicas y de edad entre ambos. En México, ésta unidad se correlaciona con el Pérmico del área de Las Delicias-Acatita, Coahuila; con las formaciones Grupera y Paso Hondo <sup>3</sup> . (pág. 2)	En el área, la formación consiste en una secuencia turbidítica que varía desde un flysch caótico (debritas) de facies de pendiente, hasta un flysch pelítico-arenoso de facies distales. El depósito se desarrolló en una cuenca profunda, cerca del talud continental, frente a una plataforma que aportó crinoides y fusilínidos, es decir, en las condiciones tectónico-sedimentarias típicas de un flysch <sup>2</sup> . (pág. 10 y11)

**II.1.1.14. Mesozoico.**

Tabla II-3. *Características de la Formación Huizachal. Elaboración propia basada en autores (Imlay, Cepeda, Álvarez, & Díaz, 1948<sup>2</sup>; Mixon, Murray, & Díaz G., 1959<sup>3</sup>; Carrillo Bravo, 1961<sup>4</sup>; Amezcua, 2006<sup>5</sup>; Rueda Gaxiola, Dueñas, Rodríguez, Minero y Uribe, 1993<sup>1</sup>; Arellano Gil, Vachard, Yussim y de Dios González, 1998<sup>6</sup>; Mendoza Rosales, 1990<sup>7</sup>).*

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
Mesozoico	Huizachal	Se define a la Formación Huizachal como los 1,400 pies, o menos de capas rojas que subyacen directamente el Jurásico Superior marino en este y norte de México, y Jurásico Inferior marino en la Huasteca de Veracruz, Puebla e Hidalgo y sobre rocas paleozoicas o probablemente precámbricas en otros lugares <sup>2</sup> . Sin embargo, se define Grupo Huizachal para incluir la secuencia lítica en la Sierra Madre Oriental (SMO) <sup>3</sup> . Y, posteriormente se retoma como Formación Huizachal <sup>4</sup> .	Los afloramientos se encuentran en la SMO, en Galeana, Nuevo León, San Marcos, Santa Clara, La Purísima y en los cañones El Alamar y La Perra, hacia el sur en el Anticlinorio de Huizachal-Peregrina, en Hidalgo, Michihuana <sup>5</sup> . Y, por último, de Jalapa a Tlahualompa, Hidalgo <sup>6</sup> .	Se integra por el Alogrupo Los San Pedros, formado por la Aloformación Huizachal; que incluye rocas félsicas que subyacen o interestratifican a los lechos rojos, con su parte basal de rocas volcánicas de composición ácida y en la cima por material vulcanosedimentario; y la Aloformación La Boca, que incluye en la base desde conglomerados hasta areniscas y en la cima limolitas. En la superficie se le estima un promedio 1,000 m de espesor, mientras que en el subsuelo de la Cuenca Tampico-Misantla cuenta con 2,200 m sin lograr atravesarla <sup>7</sup> .	En el Estado de Hidalgo, el contacto inferior de la Formación Huizachal es discordante sobre la Formación Guacamaya, observándose sobre la terracería que va del poblado de Jalapa a Tlahualompa <sup>6</sup> . “ En la terracería Huayacocotla-Zontecomatlán, cerca del caserío Mina Vieja, la Formación Huizachal subyace transicionalmente a la Formación Huayacocotla” <sup>7</sup> (pág. 11).	La edad de las rocas son según Rueda-Gaxiola et al. (1989), Triásico Superior (Rético) – Jurásico Inferior (Hettangiano) con base en palinomorfos, se considera equivalente de la Formación Egle Mills del sur de E.U.A. (Michalzyck, 1987; Salvador, 1987), también se correlacionan con el Grupo Newark en la parte oriental de E.U.A. en donde son similares a las capas rojas de la Cuenca del Golfo de México en cuanto a su composición litológica, contexto tectonoestratigráfico y edad del Triásico Superior-Jurásico Inferior (Salvador, 1987) <sup>5</sup> . (pág. 9 y 12)	Salvador (1987), indica que: Las capas rojas del Triásico Tardío-Jurásico Temprano en la parte más oriental de México fueron depositadas en una cuenca tipo rift durante la apertura del proto-Golfo de México, la cual estaba asociada al rompimiento de Pangea. Las capas rojas representan el llenado de fosas, y semi-fosas, o cuencas de rift con subsidencia activa durante su depósito, donde los sedimentos clásticos producto de la erosión de los altos estructurales fueron depositados como abanicos aluviales, o depósitos de tipo fluvial, planicie deltaica o lacustre <sup>5</sup> . (pág. 12)

<sup>1</sup> Ver la litología a detalle en: [http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1993/1993\\_Ene\\_Jun\\_01\\_X.html](http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1993/1993_Ene_Jun_01_X.html)



Tabla II-4. Características de la Formación Huayacocotla. Elaboración propia basado en el informe “Formación Huayacocotla” por Badillo-Cadena y López-Palomino (2012).

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
Mesozoico	Huayacocotla	Bóse (1898 en Aguilar, 1984) utiliza el término Lutitas Potrero, por el rancho Potrero Seco, al sureste de Huayacocotla, sin embargo, Imlay et al. (1948) propone el término Formación Huayacocotla.	Las rocas de esta formación se encuentran aflorando en el frente oriental de la Sierra Madre Oriental y en el subsuelo de la Cuenca Tampico-Misantla (PEMEX, 1988). En el Estado de Hidalgo, se ha reconocido en Tlanchinol (Ochoa-Camarillo, 1998), Tianguistengo, Tlahualompa (Carrillo-Bravo, 1965), Molango, Tenango de Doria (Ochoa-Camarillo et al., 1948), Temapá (Macías et al., 2005) y Otongo (Erben, 1956). En Veracruz se ha reconocido Huayacocotla (Imlay et al., 1948); y en Puebla se reconoció en Huachinango (Díaz-Lozano, 1916 en Silva-Pineda et al., 1988). (pág. 3)	Carrillo-Bravo (1965) señala que de base a cima está constituida por un conglomerado basal de 20 m aprox., arriba de este se hallan 40 m de calizas alternadas con areniscas con pelecípodos y sobre el cuerpo de calizas de más de 500 m de lutitas carbonosas alternadas con areniscas, además, en Hidalgo varían de más de 560 m en el Río Coyumetla, más de 800 m en el Río Chinameca y más de 1,000 m en los ríos Tianguistengo y Tlahualompa.	Sus contacto inferior y superior son en general discordantes con las formaciones Huizachal y Cahuwasas respectivamente, en algunas zonas de Cahuwasas pierde su continuidad y puede encontrarse a la Formación Huayacocotla cubierta por la Formación Tepexic en una discordancia angular. En el anticlinorio de Huayacocotla, subyace en aparente concordancia por cambio de facies a la Formación Rosario, asimismo, cubriendo a la Formación Guacamaya con un hiato marcado en discordancia angular.	De acuerdo con Rueda Gaxiola (1991-1992) la correlaciona con la Aloformación La Boca en el Anticlinorio de Huizachal-Peregrina, basado en un conjunto de palinomorfos encontrados en dicha Aloformación, los cuales revelaron una edad Sinemuriense temprano (posiblemente hasta Toarciense). (pág. 2)	Interpretaciones relativamente recientes, consideran que la presencia de fauna relativamente variada de amonites y pelecípodos, sugiere condiciones de depósito marinas someras, de baja energía, en zonas de plataforma cercanas al continente (PEMEX, 1988). (pág. 2)



Tabla II-5. Características de la Formación Cahuasas. Elaboración propia basado en el informe “Cahuasas, Formación...” por López-Palomino y Piña-Arce, (2007a).

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
Mesozoico	Cahuasas	<p>“ Carrillo-Bravo (1958) propone informalmente el nombre de Cahuasas para los lechos rojos aflorantes en el Anticlinorio de Huayacocotla de edad Jurásico Medio, posteriormente, el mismo autor en 1965 le da formalidad a dicha propuesta” (pág. 1).</p>	<p>Se distribuye en el anticlinorio de Huayacocotla, al norte y este de Tianguistengo, Hidalgo, la pendiente abrupta del Río Amajac, en el Río Claro y varios de sus afluentes al sureste de Huayacocotla, y en la región de Huehuetla (Cueva Ahumada), en la porción central de la Sierra Madre Oriental, en el subsuelo de la Cuenca Tampico-Misantla y la Cuenca de Veracruz.</p>	<p>La unidad se constituye de arenisca, conglomerado y limolita, y además reporta más de 1,200 m de espesor en la barranca del Río Amajac; mientras que en el Río Claro está representada por más de 250 m.</p>	<p>En los alrededores de Tianguistengo, la formación subyace discordantemente a la Formación Tamán y sobreyace discordantemente a la Formación Huayacocotla, en el Río Amajac descansa sobre rocas calizas con fauna del Calloviano, en la región de Huehuetla-Cueva Ahumada, también descansa sobre las capas del Liásico (Jurásico Inferior) y está cubierta discordantemente por calizas del Jurásico Superior.</p>	<p>Rueda Gaxiola (2004) le asigna una edad de Bathoniano- ¿Calloviano?, Suter (1990) menciona que la edad de esta unidad es desconocida; sin embargo, por posición estratigráfica interpreta que puede abarcar un intervalo entre el Toarciano y el Bathoniano. Salvador (1991) la correlaciona tentativamente con la Formación La Joya (Anticlinorio de Huizachal-Peregrina), basado en la similitud litológica y relaciones estratigráficas.</p>	<p>La composición litológica, la ausencia de fósiles, la distribución geográfica, el abrupto cambio de espesor y las relaciones estratigráficas sugieren que los lechos rojos del Jurásico Medio fueron acumulados como abanicos aluviales y como depósitos fluviales y lacustres.</p>

Tabla II-6. Características de la Formación Las Trancas. Elaboración propia basado en el informe “Las Trancas, Formación...” por Piña-Arce y López-Palomino (2007a).

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
<p><b>Mesozoico</b></p>	<p>Las Trancas</p>	<p>Sergerstrom (1956) describió a las rocas expuestas de la carretera entre la Ciudad de México y Zimapán, Hidalgo, las cuales se nombraron Formación Las Trancas<sup>4</sup>.</p>	<p>Se le ha reportado cerca de San Antonio de la Cal, Querétaro, aproximadamente 3 km al noreste de Bernal; asimismo, aflora cerca de los poblados Palmas y Peñamiller, Querétaro (Segerstrom, 1961b). Esta unidad ha sido estudiada en Tolimán, Querétaro además del Estado de Hidalgo al Norte de Zimapán (López-Ramos, 1979). González-Arreola y Carrillo-Martínez (1986) mencionan que esta unidad se distribuye en el área de San Joaquín-Vizarrón, en la parte nororiental del Estado de Querétaro y en la región centro-oriental de México.</p>	<p>De acuerdo con Segerstrom (1961a y b) la unidad se compone de lutita y limolita calcárea, ligeramente filitizada con intercalaciones de caliza arcillosa parcialmente piritizada y capas delgadas de grauvaca y pedernal. Además, presenta un conglomerado gris oscuro, de pocos metros de espesor, que contienen una capa de coquina en la parte basal; el conglomerado está constituido en gran parte por guijas cuarcíferas bien redondeadas; la coquina contiene muchas ostras sin costillas; sobreyacen al conglomerado unas capas de grauvaca de grano grueso e intercalaciones de lutitas, que cambian hacia arriba a conglomerado. López-Ramos (1979) señala que su espesor es del orden de 1000 m.</p>	<p>Los contactos tienden a ser muy variables. En la Formación El Doctor yace por falla sobre esta unidad en el área cercana al pueblo de Las Trancas, por otro lado, se menciona que las formaciones Tamaulipas, El Abra y Tamabra cubren a esta unidad en el área de San Antonio, Querétaro, la base de la unidad sólo es visible en el norte de Tolimán (en el Altiplano), donde descansa sobre esquisto micáceo y cuarcitas de edad desconocida (Formación Chilar), en la cima aparentemente es concordante con las Formaciones del Cretácico y al oriente se identifica con la Formación Santuario (Cretácico Inferior) (Carrillo-Martínez, 1989; López-Ramos, 1979; PEMEX, 1988).</p>	<p>Según López-Ramos (1979) la edad de los fósiles encontrados en esta unidad corresponde al Tithoniano y en parte al Kimmeridgiano hasta Neocomiano (?) (=Valanginiano). Sin embargo, González-Arreola y Carrillo Martínez (1986) en base al contenido faunístico reportan una edad Títoniana tardía. Prosiguiendo con López-Ramos (1979) y Segerstrom (1961b) en la Formación Tamán se encontraron amonites de edad Kimmeridgiana, indicando que puede ser correlacionada en edad con la Formación Las Trancas. La base representa una transición lateral de la Formación Tamán, el resto es de transición lateral de la Formación Pimienta.</p>	<p>Se indica que corresponde a un ambiente de facies de cuenca típica (López-Ramos, 1979), mientras que PEMEX (1988) menciona que el ambiente de estas rocas varía de aluvial a litoral, relacionado con la zona post-arco y arco magmático, por la presencia de tobas y lavas almohadilladas.</p>

Tabla II-7. Características de la Formación Pimienta. Elaboración propia basado en el informe “Pimienta, Formación...” por López-Palomino y Piña-Arce (2007b).

Eratema	Formación	Definición	Distribución	Litología y Espesor	Relaciones estratigráficas	Edad y Correlación	Ambiente de depósito
Mesozoico	Pimienta	<p>“ Heim (1926) propone informalmente esta unidad, a la cual nombró capas Pimienta, asignándoles una edad de Tithoniano; este mismo autor en 1940 se refiere a esta unidad como series Pimienta” (pág.1).</p>	<p>Esta unidad se encuentra distribuida en el área de Tamán, San Luis Potosí y Río Apulco, Puebla (Cantú-Chapa, 1971). Asimismo, se encuentra al oriente de México, desde la porción sur de la Cuenca de Burgos y áreas adyacentes de la Península de Tamaulipas, así como en el frente de la Sierra Madre Oriental (PEMEX, 1988). López-Ramos (1979) menciona que se distribuye en los anticlinorios Huayacocotla y Huizachal.</p>	<p>Hermoso de la Torre y Martínez-Pérez (1972) mencionan que la unidad en su parte basal está constituida por caliza arcillosa de estratificación delgada con bentonita y pedernal negro, mientras que en la cima se compone de caliza arcillosa con intercalaciones de lutita y nódulos de pedernal negro. Heim (1926). En el área de Tamán, San Luis Potosí Hermoso De La Torre y Martínez-Pérez (1972) reportan un espesor incompleto de 195 m en la sección aflorante en el río Moctezuma, mientras que Pedrazini y Basañez (1978) mencionan que su máximo espesor se presenta en esta sección, donde supera los 600 m.</p>	<p>Subyace concordante a la formación Chapulhuacán, al nororiente de la Plataforma Valles-San Luis Potosí y a la Formación El Abra, en el Pozo Valle de Guadalupe-1; suprayace concordantemente a la Formación Tamán, excepto al surponiente de Iztapala, donde yace directamente sobre el basamento metamórfico (Formación Huiznopala). Cantú-Chapa (1971, 1984), Carrillo-Bravo (1971), Hermoso De La Torre y Martínez-Pérez (1972) mencionan que el contacto inferior de la Formación Pimienta es transicional y concordante con la Formación Tamán y el contacto superior es también concordante y transicional con la Formación Tamaulipas Inferior. (pág. 2)</p>	<p>Tiene un alcance del Tithoniano al Berriasiano/Valanginiano<sup>4</sup>. López-Ramos (1979) y Olóriz et al. (2003) la correlacionan con la Formación La Casita. Según el análisis realizado de la información publicada por Salvador (1991), se considera que esta unidad se correlaciona en tiempo con las formaciones Las Trancas (Querétaro e Hidalgo), parte superior de La Casita (noroeste de México), Bosier (Sur de Texas), parte superior de la Tepexilotla (área de Córdoba) y más hacia el sur con la parte media de la Caliza Chinameca. (pág. 3)</p>	<p>Aguilera (1972) sugiere un ambiente de plataforma sumergida inestable, de agua tranquilas, claras y salinidad normal.</p>

Tabla II-8. Características de las formaciones Tamán, Chipoco y Santiago. Elaboración propia basado en autores (López-Palomino y Ramírez-Garza, 2008<sup>1</sup>; López-Palomino y Piña-Arce, 2007<sup>2</sup>; López-Palomino y Juárez-Arraiga 2008<sup>3</sup>)

Mesozoico		Eratema
Santiago <sup>3</sup>	Chipoco <sup>2</sup>	Tamán <sup>1</sup>
Formación	Formación	Formación
Definición	Definición	Definición
Distribución	Distribución	Distribución
Litología y Espesor	Litología y Espesor	Litología y Espesor
Relaciones estratigráficas	Relaciones estratigráficas	Relaciones estratigráficas
Edad y Correlación	Edad y Correlación	Edad y Correlación
Ambiente de depósito	Ambiente de depósito	Ambiente de depósito
Esta unidad fue propuesta en forma inédita por Reyes (1964), a la cual denominó “Lutita Santiago”.	Hermoso De La Torre y Martínez-Pérez (1972) proponen el nombre de Formación Chipoco.	Heim (1940) refiere a la unidad como Formación Tamán.
Se distribuye en Molango, Pisaflores, Huehuetla y Tenango, Hidalgo.	Aflora en Totoncapa, Atempa, Chipoco, Amixco y Calnali, en el Estado de Hidalgo y en el subsuelo con la Cuenca de Chicontepec.	Tamán, San Luis Potosí, en Huehuetla, Pisaflores, Hidalgo y en el subsuelo de la Cuenca Tampico-Misantla.
Se compone de lutitas negras con nódulos calcáreos. En huehuetla, Hidalgo presenta un espesor de 110 m y en Soledad-Miquela en el subsuelo varía de 155-306 m.	Está constituida por <i>grainstones</i> y <i>mudstone</i> , alternado con lutita calcárea. Velázquez y Palazuelos (1976) reportan para la sección San Antonio 480 m.	Se compone de caliza negra bien estratificada con interlechos de lutita negra. Se registra en el valle de Tancuilín más de 500 m; en el Valle del río Amajac y valle del río Claro hasta 400 m (Suter, 1990).
Su límite inferior es transicional y concordante con la Fm. Tepexic, subyace transicional y concordante con la Fm. Tamán y subyace discordante con la Fm. Chipoco.	Subyace concordante con la Fm. Tamán y subyace transicionalmente a la Fm. Pimienta, además, descansa concordante con la Fm. Santiago	Suprayace discordantemente a la Formación Cahuassas, subyace concordante y transicional a la Formación Pimienta y su límite inferior es concordante y transicional con la Fm. Santiago.
Se le asignó una edad Calloviana a Oxfordiana. Se correlaciona hacia el este de la Sierra Madre con la Fm. Zuloaga.	Ochoa-Camarillo et al. (1998) asigna una edad Kimmeridgiana temprana-Tithoniana temprana. Se correlaciona en tiempo con la Fm. Tamán (Aguilera, 1972).	Kimmeridgiano temprano al Tithoniano temprano. Se correlaciona con el miembro San Andrés y con un cambio lateral con la Fm. Chipoco en Hidalgo.
Pedrazzini y Basáñez (1978) señalan que se depositó en condiciones marinas tranquilas reductoras de facies de cuenca.	Somero de plataforma, de talud externo de plataforma y cuenca.	Salvador (1999) menciona ambiente de plataforma abierta y Pessagno et al. (1987) ambiente desde abisal a batial.

### II.1.1.15. Cretácico.

Dentro de la edad de las rocas en el sistema Cretácico Inferior, se encuentra una diversa litoestratigrafía, caracterizada predominantemente por rocas calizas, seguido por lutitas y areniscas, de las siguientes formaciones: 1) Formación Santuario (Segerstrom, 1962), está constituida por calizas grises oscuras, calcarenita, lutita filítica y *greywacke*, esta formación tiene una edad Valanginiana-Hauteriviana (Imlay, 1953; como se citó en Segerstrom, 1962); 2) Formación El Doctor (Wilson et al., 1955; en Piña-Arce y López-Palomino, 2007b) se constituye de cuatro facies de rocas sedimentarias carbonatadas con pedernal, con una edad Albiana-Cenomaniana (Mendoza-Rosales, 1990; citado en Piña-Arce y López-Palomino, 2007b); 3) La Formación El Abra (Aguayo-Camargo, 1975; como se citó en López-Palomino y Piña-Arce, 2009f) está constituida por dos facies de calizas bien estratificadas, la facie El Abra que se compone por un *mudstone* interestratificado con *wackestone* y la facie Taninul, conformada por bancos de rudistas asociados con *mudstone*, *wackestone* y *packstone*, y se determinó un rango de edad (Bonet, 1963; citado en López-Palomino y Piña-Arce, 2009f) Albiana-Cenomaniana; 4) Formación Tamabra (Heim, 1940, Enos, 1977; en López-Palomino y Piña-Arce, 2007d) la define Heim y Enos, la describe como, *grainstone* y *packstone* con fragmentos de bioclastos, *wackestone* de rudistas, *wackestone* con microfósiles pelágicos, brecha con clastos de *grainstone*, *packstone* y *wackestone* y dolomía, se le asigna una edad (López-Palomino y Piña-Arce, 2007d) Albiana Temprana-Cenomaniana; 5) Por último, se tienen dos formaciones (Araujo-Mendieta, 1978), la primera es la Formación Tamaulipas Inferior, se interpreta de una edad Berriasiana-Aptiana (Armas Zagoya, 2004), debido a que la cima de la formación es concordante a la Formación Tamaulipas Superior, al oeste de Coscomatepec, Veracruz (Manjarrez-Hernández y Hernández de la Fuente, 1989; como se citaron en Remigio-Morales, 2013), se menciona que

está constituida por rocas calcarenitas, bentonitas y calcilitas (Araujo-Mendieta, 1978), y la segunda es la Formación Tamaulipas Superior de una edad Albiana-Cenomaniana (Aguilera y Araujo, 1962, 1977; en Araujo-Mendieta, 1978) y se constituye de rocas calizas de textura fina, con algunas capas de caliza cristalina gruesa e intercalaciones de bentonita y pedernal negro.

La litoestratigrafía del Cretácico Superior se caracteriza de las siguientes formaciones: 1) La Formación Soyatal tiene una edad (González-Casildo, 1998; como se citó en López-Palomino y Piña-Arce, 2007e) Turoniano medio al Santoniano, con base en la presencia de foraminíferos (*Whiteinella paradabia*, *W. archaeocretae* y *Clavhedvergella simples*), según Camarillo (1980; como se citó en López-Palomino y Piña-Arce, 2007e) menciona que la base consiste en estratos de 10 a 20 cm de espesor de caliza con textura *mudstone-wackestone* intercalada con lutita negra, y aumenta su espesor hacia la parte de arriba; 2) La Formación Mexcala se le asigna una edad según Ramírez-Garza, López-Palomino y Zamudio-Ángeles (2008) de Cenomaniana-Maastrichtiana, y según Fries (1958, 1960; citado en Ramírez-Garza, López-Palomino, y Zamudio-Ángeles, 2008) menciona que la litología de esta unidad es muy variable tanto vertical como horizontalmente e incluye una sucesión de capas interestratificadas de arenisca, limolita y lutita calcáreas con escasos lentes de caliza clástica.

#### **II.1.1.16. Cenozoico.**

El eristema Cenozoico en el Estado de Hidalgo corresponde en su mayor parte a rocas volcánicas, con excepción del grupo El Morro, cuyo origen es continental y las formaciones Tarango y Atotonilco El Grande, que conforman los rellenos de valles. Dentro del Cenozoico (Plioceno Superior) se presentan rocas intrusivas de origen ígneo hipabisal o subvolcánica de poca profundidad, intrusionando a rocas cretácicas y cenozoicas (Piñeiro Ramírez, Inventario Físico de los Recursos Minerales de la Carta Actopan F14-D, 2011).



La litoestratigrafía que presenta está conformada por: Las formaciones Chicontepec, El Morro, Grupo Pachuca, formaciones Las Espinas, Don Guinyo, Zumate, San Cristobal, Tlanchinol, Riolita Navajas, Tarango, Atotonilco El Grande y Guajolote (SGM, 1997).

## **II.2. Geología local**

La geología local se ubica en el límite de la zona de estudio y se delimita dentro de las cartas geológico-minera Actopan y Pachuca (claves F14-D71 y F14-D81) El área se ubica en el segmento sur del Estado de Hidalgo. Su morfología consiste en montañas plegadas poco abruptas en la parte este, y en la fracción oeste se conforma de una gran planicie donde se encuentra la ciudad de Actopan. (SGM, 1995 y 2007).

La edad de las rocas que afloran tienen un registro geológico de tiempo, que varía desde el período Cretácico hasta la época Holocena. La formación rocosa más antigua es “El Doctor”, constituida por calizas con fósiles rudistas y gasterópodos de ambientes profundos hasta arrecifales, después continúa la Formación Méndez, teniendo lutitas, margas y areniscas depositadas en agua profunda de cuenca. El cenozoico se compone de rocas volcánicas intermedias a ácidas, con excepción del Grupo El Morro que contiene conglomerados (Wilson, Hernández M., y Meave T., 1955; Palmer, 1927; Ifrim, Stinnesbeck, & Schafhauser, 2005; SGM, 1995 y 2007).

### **II.2.1. Estratigrafía local.**

En este tema se presenta la descripción de las unidades litoestratigráficas del área de estudio, así como la columna estratigráfica (véase Fig. II-4) basado en los autores de este punto.

Se consideró la geología (véase Fig. II-5 y apartado de anexos, Mapa 1) en base a las cartas ya mencionadas de Actopan y Pachuca, dentro de las coordenadas latitud 20°26'9.473"N, 20°10'54.211"N, y longitud 98°59'36.377"W, 98°47'3.174"W.



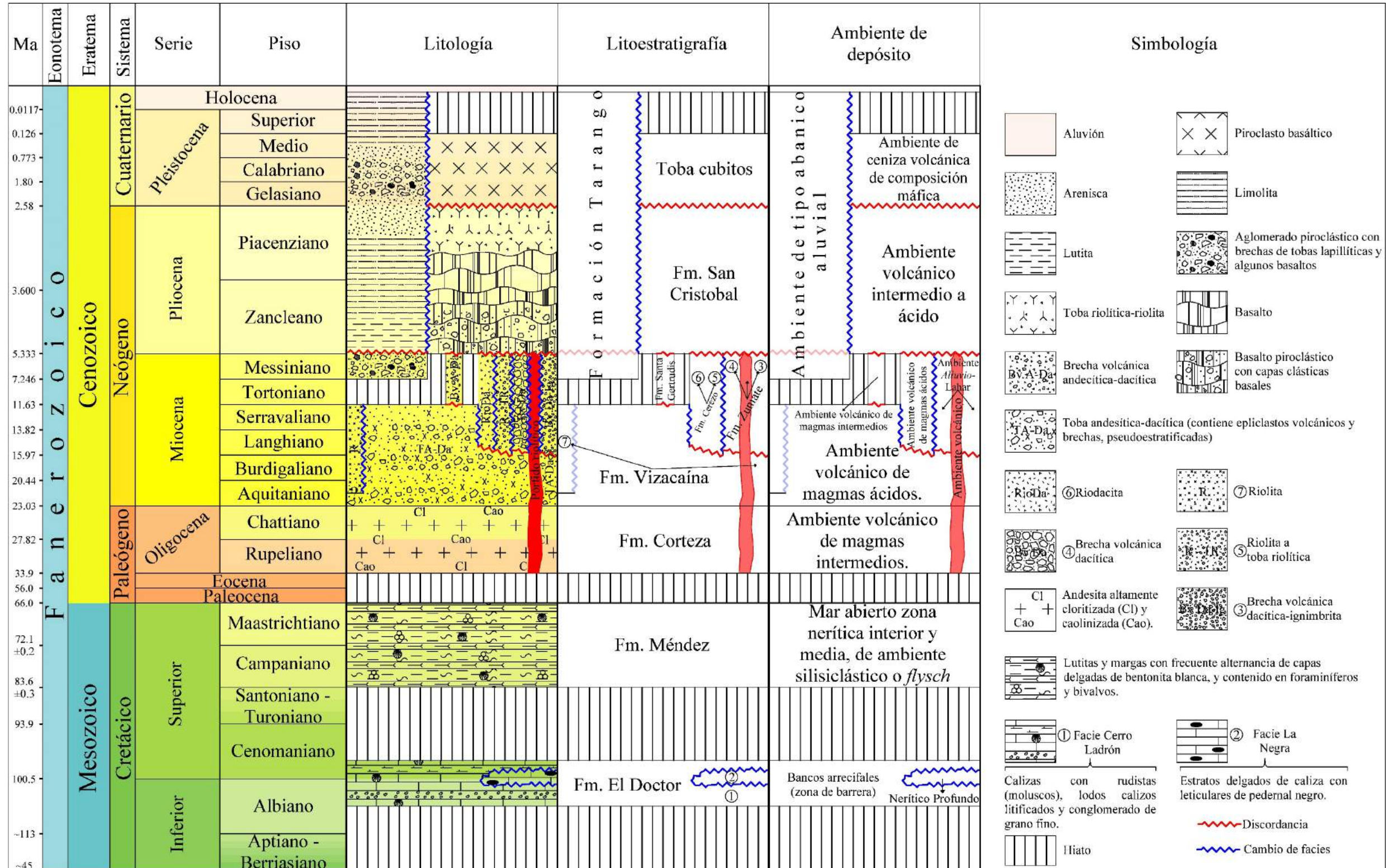


Figura II-4. Columna estratigráfica local de los eratemas Mesozoico y Cenozoico. Elaboración propia.



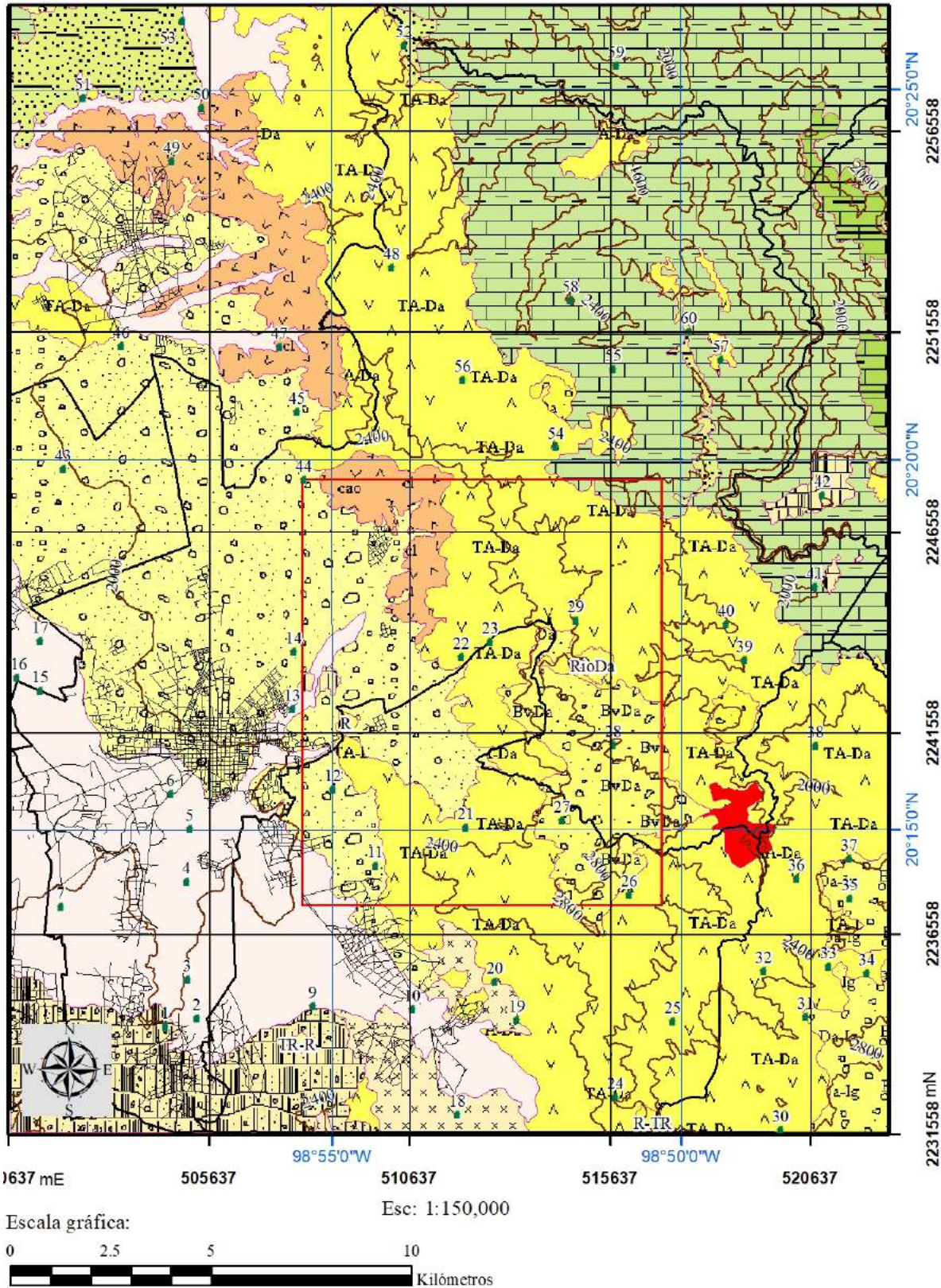
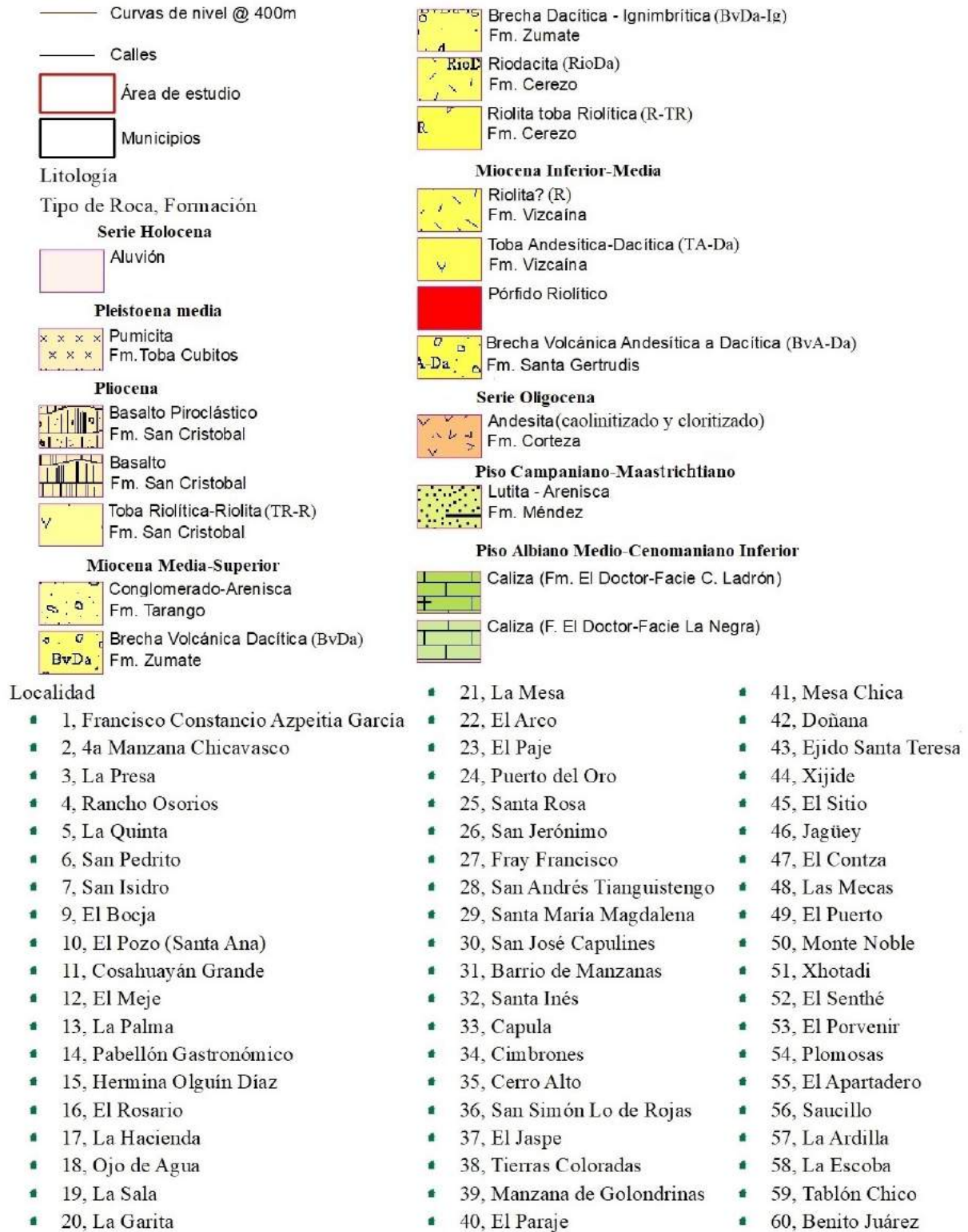


Figura II-5. Mapa geológico local. Elaboración propia basado en De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta y Sánchez Bermeo (1995) y Sánchez Rojas, Arredondo Mendoza y Cardoso Vázquez (2007).





### ***II.2.1.1. Cretácico.***

#### ***II.2.1.1.1. Formación El Doctor.***

**Definición:** Los autores Wilson, Hernández M., y Meave T. (1955) propusieron el término “el complejo calizo El Doctor”, en nombre al distrito minero El Doctor, ubicado al este de Querétaro. Segerstrom (1961) propone a una masa de la caliza El Doctor el nombre de “banco Ixmiquilpan”, que afloran hacia el oriente y al sur de Ixmiquilpan, Hidalgo, con bioestromas y sin pedernal, encontrando en abundancia microfósiles de rudistas y gasterópodos.

**Distribución:** Se ubica en la parte oriental del Estado de Querétaro y se extiende hasta los límites con el Estado de Hidalgo, quedando como 25 km al poniente de Zimapán (Wilson et al., 1955). De acuerdo con Mendoza Rosales (1990) “Se presenta a lo largo del río Moctezuma, agua debajo de su confluencia con el río Tula; al poniente de Pontiu; en las cercanías de Mesa León; y al sudoeste de Zimapán, en el Cerro Daxí” (pág. 11).

**Litología y espesor:** Wilson et al. (1955) dividen a esta caliza en cuatro facies, que forman fajas orientadas al noroeste y se denominan de noreste a suroeste, de las cuales, en el límite de estudio se encuentran; 1) Facies La Negra, consiste en estratos de caliza de 10 a 20 cm de espesor, son comunes las intercalaciones de lutita roja, teniendo un espesor total de no más de 300 m; 2) Facies Cerro Ladrón, limitada al noroeste por la caliza clástica de la facies El Socavón y, hacia el suroeste, por la facies La Negra, consiste en estratos delgados de caliza alternados con lenticulares de pedernal negro, la anchura máxima de la faja es de 20 km y el espesor máximo se aproxima a los 1,500 m, esta facies (Cerro ladrón), dividida en tres subfacies, que son; subfacies con rudistas, subfacies de lodos calizos litificados y una subfacies de conglomerado de grano fino.

**Relaciones estratigráficas:** Según Wilson et al. (1955), la caliza El Doctor está cubierta por la Formación Soyatal e infieren que su contacto puede ser concordante en algunos lugares y discordante en otros. Segerstrom (1961) menciona que en el suroeste del Estado de Hidalgo la caliza El Doctor yace sobre la Formación Santuario en la parte oriental del área, y directamente sobre la Formación Las Trancas en la parte occidental, no es aparente una discordancia angular entre las calizas y las rocas subyacentes.

**Edad, correlación y contenido paleontológico:** Debido a los diferentes macrofósiles de rudistas, pertenecientes a los géneros *Caprinuloidea*, *Toucasia*, y ejemplares de los géneros *Radiolites*, *Eoradiolites* y *Monopleura* (Müllerried, 1939; como se citó en Segerstrom, 1961) y gasterópodos de los géneros *Nerinea* y *Actaeonella*, y los pelcípodos que incluyen *Chondrodonta*, *Pinna* y *Neithea*, se infiere una edad Albiana Media-Cenomaniana Temprana y se correlaciona con la caliza El Abra, de la cuenca Tampico-Misantla, al noreste (Bonet, 1952; citado en Segerstrom, 1961), y con la Formación Morelos al sur (Fries, 1956; citado en Segerstrom, 1961). Por otro lado, Mendoza Rosales (1990) menciona que, la caliza El Doctor se correlaciona con la Formación Cuesta del Cura y con la parte alta de la Formación Peña Azul, también se correlaciona con la Formación El Abra, expuesta en la plataforma de Valles-San Luis, con la Formación Orizaba de la cuenca de Veracruz, con la Formación Morelos, y con la Caliza Sierra Madre de Chiapas.

**Ambiente de Depósito:** La caliza El Doctor presenta una diferenciación de ambientes de depósito en sus facies; 1) Facies La Negra, se infiere que fue depositada en la parte profunda de la zona nerítica; 2) Facies Cerro Ladrón, se infiere un ambiente de bancos arrecifales (Wilson et al., 1955).

### **II.2.1.1.2. Formación Méndez.**

**Definición:** Méndez-Papagallos fue descrita primero por Jeffreys (1910; citado en Palmer, 1927), como lutita Méndez y estudiada por Cummins & Dumble (1915; citado en Palmer, 1927) en las colinas Papagallos al oeste de Ramones en Nuevo León.

**Distribución:** Según Carrillo-Bravo (1971), los sedimentos de esta formación rellenan a la mayoría de los sinclinales que se encuentran en el frente este de la Sierra Madre Oriental.

La Formación Méndez a veces no se puede separar de la Formación San Felipe, por lo que, en cuanto a su distribución, se encuentra en la Planicie Costera del Golfo hasta el frente de la Sierra de Juárez, Oaxaca, apareciendo en el subsuelo, en los campos petroleros (López-Ramos, 1979).

**Litología y espesor:** La primera observación descrita por Jeffreys (1910; citado en Palmer, 1927), menciona que la misma formación en Méndez entre Tampico y Ebano, consiste en un depósito muy uniforme de lutitas grises a azules. Dumble (1915), describe una serie de lutitas arcillosas limosas de grano muy fino azules o negras, cafés meteorizadas, amarillas o blancas, en las cuales no se encontró fósiles, estas lutitas llevan ambos selenita y barita, y tornan en partículas saladas. Carrillo-Bravo (1971) expresa que la formación muestra pocas variantes litológicas y en general está constituida por lutitas y margas de color gris y gris verdoso, en capas medianas y gruesas, que con frecuencia alternan con delgadas capas de bentonita blanca.

El espesor es variado, al oeste de Tampico la Formación Méndez en Furberos, es aproximadamente de más de 1,200 m (DeGolyer, 1916; citado en Palmer, 1927). Por otro lado, Carrillo-Bravo (1971) menciona que en el área de Jaumave es de más de 100 m, en la región de San Nicolás, La Concha y Sinclinal de Valles, varía de 150 a 300 m, y en la margen sureste de la

Plataforma Valles-San Luis Potosí (sursureste de Aquismón) varía de 500 a poco más de 1,000 m.

**Relaciones estratigráficas:** El límite superior es transicional y concordante con la caliza Velasco en la Sierra de El Abra (Santamaría-Orozco et al., 1990) y Península de Tamaulipas, mientras que en la Sierra de Chiapas y Cuenca del Sureste es transicional con la Lutita Nanchital; por otro lado, en la Cuenca de Tampico-Misantla subyace a la Formación El Abra (PEMEX, 1988). El límite inferior de manera general es transicional y concordante con la Formación San Felipe (PEMEX, 1988); asimismo, se encuentra en discordancia con la Formación El Abra (Carrillo-Bravo, 1971; PEMEX, 1988; Santamaría-Orozco et al., 1990). Cabe mencionar que en la Cuenca del Sureste el contacto inferior está definido por un *hiatus* sobre sedimentos del Cretácico Inferior, o bien localmente ausente al sur-suroeste del Villahermosa Tabasco (PEMEX, 1988). (Piña-Arce & López-Palomino, 2007c, pág. 2 y 3)

**Edad y correlación:** Por su contenido faunístico y posición estratigráfica se le asigna una edad Campaniana-Maastrichtiana, esta formación es correlacionable con la Formación Mezcala del centro de México (Carrillo-Bravo, 1971).

**Contenido paleontológico:** Se han reportado fósiles del *Filum Foraminifera*, *Globotruncana conica*, *Globotruncana contusa*, *Globotruncana sp.*, *Globotruncana ventricosa*, *Gumbelina globosa*, *Planulina dayi*, *Steinsiona pomerana*, *Clavulinoides trilatera* (Carrillo-Bravo, 1971), *Anomalinoides acutus sp.*, *Anomalinoides ammonoides sp.*, *Cibicidoides howeli sp.*, *Cibicidoides naranjoensis sp.*, *Cibicidoides pseudoacutus sp.*, *Clavulinoides trilatera sp.*, *Eouvigerina subsculptura sp.*, *Gyroidinoides beisseli sp.*, *Gyroidinoides depressus sp.*, *Gyroidinoides globus sp.*, *Nuttallides truempyi sp.*, *Sitella Cushmani sp.*, *Steinsioeina beccariiformis sp.*, entre otros (Alegret & Thomas, 2001), y se han reportado especímenes



aislados del bivalvo *Tampsia* (Stephenson, 1941; citado en Ifrim, Stinnesbeck, & Schafhauser, 2005).

**Ambiente de Depósito:** Carrillo-Bravo (1971) sugiere que estas rocas se depositaron en mares abiertos, de profundidades considerables. Por otro lado, los autores Ifrim, Stinnesbeck, & Schafhauser (2005) sugieren un ambiente de agua profunda de cuenca.

### **II.2.1.2. Cenozoico.**

#### **II.2.1.2.1. Grupo El Morro.**

**Definición:** La unidad litoestratigráfica fue descrita y propuesta por Simons & Mapes V. (1956) como el fanglomerado “El Morro”. Su nombre proviene de las exposiciones aflorantes del Cerro El Morro. Más tarde, Segerstrom (1961) propone el término “Grupo El Morro”, para incluir en un solo grupo los conglomerados y las capas asociadas de numerosas localidades aisladas.

**Distribución:** Se distribuye en el camino de la mina San Pascual, cerca del cerro El Morro, a 6 kilómetros al noroeste de Zimapán, también se distribuyen en los alrededores del río Tolimán, dentro del Estado de Hidalgo (Simons & Mapes V., 1956). Carrasco-Velázquez, Martínez-Hernández, & Ramírez-Arriaga (2009) indican que se distribuye restringidamente al oeste y noroeste de Zimapán, la localidad tipo en el cerro El Morro (a 6 km al noroeste de Zimapán) está situada en una franja orientada NO-SE de aproximadamente 11 km de largo y anchuras de 3 y 0.5 km,. Según Segerstrom (1962), el conglomerado bien endurecido sin constituyentes volcánicos ocurren en pequeños afloramientos, ambos al noroeste y suroeste del Puerto de Las Trancas, en el flanco noroeste de la Sierra de Juárez, a lo largo de la base este de la Sierra de Xinthé, al oeste de Puerto Los Pastores (Xuchitlán, Hidalgo), en el lado sur del cerro Peña Colorado (norte de Tepatepec), en los cañones del río Metztlán (cerca de La Paila) y en el

río Amajac, también se reconoce el fanglomerado El Morro en los alrededores de Santa María Ajoloapan, Estado de México.

**Litología y espesor:** Simons & Mapes V. (1956) caracterizan al fanglomerado El Morro que es notablemente uniforme en litología en todo el distrito. Típicamente es una roca muy endurecida, de color rojo, gris rojizo o gris púrpura, que consiste en su totalidad en guijarros angulosos a subangulares y en adoquines grises, o menos comunmente caliza parda, la mayoría de los fragmentos son de 2 a 20 cm de ancho, unos pocos cantos rodados son de 45-50 cm de largo, y el más largo midió cerca de 1.5 metros de ancho, la matriz consiste largamente en arena caliza, y en menor, cuarzo, feldespatos, y granos de mica; Ramírez Tello, Zárate López, & García Ortiz (2009), hacen mención de que el Grupo El Morro es una secuencia de conglomerado polimíctico, constituido por guijarros y clastos de composición calcárea, así como dolomía y arenisca de grano fino, con intercalaciones de lavas de composición andesítica y basáltica.

Tiene un rango de espesor de 400 m (Simons & Mapes V. (1956)). Segerstrom (1962) indica que cerca de Santa María Ajoloapan el espesor es de 100 m, pero es probablemente solo a unas pocas decenas de metros de espesor en las otras localidades.

**Relaciones estratigráficas:** “El conglomerado bien endurecido del fanglomerado El Morro yace discordantemente sobre las calizas El Doctor cerca de la Paila, Hidalgo” (Segerstrom, 1962, pág. 109). En base a los estudios geológicos de Villaseñor-Cabral, Gómez-Caballero, Condliffe, & Medina de la Paz (2000) y de Simons & Mapes V. (1956): El Grupo El Morro sobreyace discordantemente a las rocas cretácicas en el área de Zimapán, Hidalgo, de la cual se encuentra, la Formación Soyatal aproximadamente a tres kilómetros al sureste de la mina

San Pascual y en concordancia le sobreyace un pórfido monzonítico en la mina Santa Gorgonia, áreas cercanas a Benito Juárez y de igual forma en el área de Zimapán.

**Edad y correlación:** Por la ocurrencia de fragmentos de caliza y las relaciones con otras rocas se sugiere que el grupo es equivalente en edad e historia deposicional a los llamados conglomerados rojos de Guanajuato (Edwards, 1955; citado en Segerstrom, 1962). De acuerdo con un estudio realizado por Juárez-Arriaga & López-Palomino (2009) mencionan que: “Asimismo, se ha correlacionado con el Grupo Balsas (Geyne et al., 1963; Yta y Moreno-Tovar, 1997) y con el Conglomerado rojo de Zacatecas (Yta y Moreno-Tovar, 1997) (...) finalmente, Carrasco-Velásquez et al. (2008) la correlaciona con la Formación Metztlán” (pág. 3). Debido a la no presencia de fósiles, de acuerdo con Simons & Mapes V. (1956) en su correlación con los conglomerados rojos de Guanajuato, se indicó una edad para la parte basal, Eocena-Tardía a Oligocena-Temprana.

**Contenido paleontológico:** Simons & Mapes V. (1956) mencionan que no hay presencia de fósiles autóctonos, sin embargo, menciona que dentro del conglomerado se tiene cantos de caliza fosilífera del Cretácico Temprano.

**Ambiente de Depósito:** En base a la descripción de Simons & Mapes V. (1956), se sugiere un ambiente continental de tipo abanico aluvial, conforme a la litología descrita.

#### **II.2.1.2.2. Formación Santiago (Riolita Santiago).**

**Definición:** Geyne, Fries y Probert (1963) mencionan que el nombre de la Formación Santiago se propone según el nombre del cerro en el que se halla su área de afloramiento más extenso, o sea el cerro Santiago o de Coronas (8,600N-15,100E), ubicado al oriente del centro comercial principal de Pachuca. El flanco meridional de este cerro se considera como la localidad tipo en la parte superior de la formación. En los mapas e informes privados de la Cía.



de Real del Monte y Pachuca, esta unidad se denomina “andesita Fortuna”, según el nombre del crucero principal de la mina San Jaun Pachuca.

**Distribución:** Geyne et al. (1963) mencionan que esta unidad está limitada a sitios que contienen rocas más jóvenes, además de la localidad tipo en el Cerro Santiago, aparecen unos cuantos afloramientos al sur del tiro Cuixi (9,400N-13,800E), al poniente del centro comercial de Pachuca.

**Litología y espesor:** Las rocas que componen la Formación Santiago generalmente son porfídicas y varían en tamaño de grano desde fino a grueso. Contienen de 20 a 30 por ciento de fenocristales, que consisten en su mayoría de plagioclasa y en menor de piroxena y anfíbola alteradas. La matriz varía en textura de densa a grano fino. La estructura fluidal primaria está bien desarrollada en derredor de los fenocristales en la matriz densa o vítrea. Un rasgo característico de la roca es una estructura fluidal ondulada gruesa, con buzamientos fuertes, marcada en parte por capas prominentes de 1 a 2 cm de espesor, compuestas por material de grano fino, y en parte por lentes densas en forma de escobillas en la matriz. Al observarse estas capas, se ven contorsionadas y muestran una tendencia a acomodarse en forma curva en derredor de los fenocristales de feldespato. Las inclusiones son raras. Posiblemente un parte de este material representa derrames piroclásticos más bien que derrames lávicos. El espesor expuesto de la formación es de unos 480 m, pero en vista de que su base no se ha alcanzado en los laborios mineros, el espesor máximo debe ser algo mayor, posiblemente tanto mayor como varios cientos de metros. La formación se acuña al noreste fuera del distrito, por el traslape sobre las rocas del Cretácico Superior de la Formación Mexcala-Méndez cerca de San Miguel Regla. (Geyne et al., 1963, pág. 35)

**Relaciones estratigráficas:** La base de la Formación Santiago no está expuesta en el distrito minero, pero los afloramientos ubicados más al norte y al noreste del distrito sugiere que la formación descansa discordantemente sobre el Grupo El Morro, o con discordancia angular sobre las formaciones cretácicas. La cima de la formación Santiago es probablemente una superficie de erosión. La presencia, por lo menos, de un relieve bajo sobre esta superficie está indicada por la inclinación muy variable en rumbo y buzamiento de la superficie de la formación en donde está cubierta por la siguiente unidad más joven, que es la Formación Corteza. (Geyne et al., pág. 36)

**Edad y correlación:** Según Sánchez Rojas, Arredondo Mendoza, y Cardoso Vázquez (2007) la edad correspondiente a la riolita Santiago es de Oligocena Temprana, posiblemente más antigua. No existe hasta el momento una correlación para ésta formación.

**Ambiente de depósito:** Sánchez Rojas et al. (2007), mencionan que es de un ambiente volcánico.

#### **II.2.1.2.3. Formación Corteza.**

**Definición:** Según Geyne, Fries, y Probert (1963) expone que: El nombre Formación Corteza se propone aquí para esta unidad, según la veta Corteza de la mina San Juan Pachuca, de la que forma respaldo alto de una distancia de 1,000 m a lo largo del nivel 270 (...) la Formación Corteza anteriormente formó parte de la serie fortuna de Hulin (1929a) y se denominaba la “andesita negra”. (pág. 36)

**Distribución:** Las áreas de afloramiento de la Formación Corteza en el distrito minero están limitadas a las inmediaciones de la ciudad de Pachuca. Lo que parece ser la misma formación aflora en la barranca del Río Amajac al norte del distrito minero, donde sobreyace a rocas parecidas a las de la Formación Santiago. En el subsuelo en el área de Pachuca la



formación se presenta en un área amplia en el nivel Fortuna, a 2,200 m sobre el nivel del mar, y se extiende en una faja relativamente angosta hacia el noroeste, atravesando la parte suroccidental del distrito. (Geyne et al., 1963, pág. 37)

**Litología y espesor:** Su base consiste en un miembro tobáceo de color variable de rojo oscuro a gris claro, debido a la alteración de óxidos de fierro presentes, se compone de partículas del tamaño de limo y está bien litificada. El origen de esta limolita fue una roca andesítica y fue altamente cloritizada y caolinizada por fluidos hidrotermales. Se presentan variaciones en su composición mineral, que una parte de la roca puede llamarse basalto de pigeonita y otro basalto de cuarzo y pigeonita, sin embargo, se toma como una andesita. Su espesor es variable de acuerdo con el lugar, se presume que el espesor mínimo es de 50 m en el área al sur del tiro Paricutín, hasta un máximo aproximado de 300 m en un punto ubicado medio kilómetro al poniente del tiro San Juan Pachuca (Geyne et al., 1963).

**Relaciones estratigráficas:** Sobreyace a la Formación Santiago con una discordancia erosional ligera, pero sin discordancia angular reconocible, tanto en donde el contacto está expuesto en cortes a lo largo de un camino abandonado cerca de la curva de nivel 2,550 m en el flanco noroccidental del Cerro de Santiago (8,800N-15,200E), como en el crucero Fortuna de la mina San Juan Pachuca cerca de las coordenadas 9,700N-13,500E (véanse láms. 1, 2 y 3). (Geyne et al., 1963, pág. 36)

**Edad y correlación:** De acuerdo con los autores Geyne et al. (1963), no mencionan la edad, sin embargo, la colocan en las columnas estratigráficas en la edad Oligocena. La correlación de esta Formación no ha sido documentada.

**Ambiente de depósito:** Geyne et al. (1963) mencionan que en la mayoría son derrames andesíticos-pigeoníticos, por lo que, se infiere un ambiente volcánico de magmas en una composición silícea intermedia parcialmente en la unidad de roca.

#### **II.2.1.2.4. Formación Santa Gertrudis**

**Definición:** Consiste en derrames masivos de brechas volcánicas con otras capas clásticas y tobas de composición andesítica primordialmente, y en algunas partes cambia por transición en dacita, se propuso el nombre de la Formación Santa Gertrudis por la veta Santa Gertrudis, se diferencia por sus derrames gruesos de andesita y dacita de piroxena, porfídicas (Geyne, Fries, y Probert, 1963).

**Distribución:** Su afloramiento se distribuye en tres áreas hacia el noreste, este y sureste de la ciudad de Pachuca, y al norte y noreste de Real del Monte. Una gran área se expone cerca de la veta Vizcaína (Geyne et al., 1963).

**Litología y espesor:** Su base consiste en un miembro tobáceo de menos de 1 m de espesor, parece tener una composición dacítica, en algunos lugares donde está ausente este miembro se tiene, una capa de roca afanítica gris con 2 cm de espesor. Se compone principalmente de rocas andesíticas-dacíticas debido a la variación de los minerales con matriz afanítica, dispuesta en brechas de derrames, y tienen inclusiones abundantes de diámetros de 2 y 3 cm, espaciadas. Su espesor es de 350 m, cerca del tiro Sagrado Corazón, y se extiende al oriente en una faja de 205 – 300 m y 200 m hacia el oriente del distrito minero (Geyne et al.).

**Relaciones estratigráficas:** Sobreyace concordantemente a la Formación Real del Monte en algunos horizontes, es observable erosión en la parte superior subyaciendo a la Formación Vizcaína (Geyne et al., 1963).

**Edad y correlación:** Su edad según De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta, & Sánchez Bermeo (1995), es “Miocena”. Su correlación no ha sido documentada.

**Ambiente de depósito:** Geyne et al. (1963), menciona que son brechas de derrames andesíticos-dacíticos, por lo que, se infiere un ambiente volcánico de magmas con un contenido de sílice intermedio.

#### **II.2.1.2.5. Formación Vizcaína**

**Definición:** Se compone de derrames de lava, brechas, tobas, y un miembro clástico extenso, todas de composición andesítica y dacíticas, se propuso el nombre por la falla y veta del mismo nombre por la ciudad de Pachuca (Geyne, Fries, y Probert, 1963).

**Distribución:** Según Geyne et al. (1963) se localiza prácticamente en toda la parte, nororiental y noroccidental del distrito minero.

**Litología y espesor:** En su base tiene un miembro volcánico epiclástico tobáceo, ubicado en un corte de carretera al oriente del tiro San Pedro. Encima, continuando con la base se tiene una brecha de derrame de la Formación Real del Monte se presenta una capa de detritos de 1 m de espesor, compuesta por bloques de lava en una matriz tobácea. Arriba de la capa basal, se presenta capas de brecha volcánica y arenisca tobácea, de colores pardo rojizo pálido a blanco verdoso, este material está bien pseudoestratificado, con una alternancia de capas clásticas, de 1 o 2 m de espesor, de composición andesítica y dacítica. En la parte oriental subterránea de la mina, tiene una profundidad de 500 – 600 m, la parte más gruesa de la Formación Vizcaína es de 600 m aprox., ubicada al oriente del distrito minero, en otras partes varía de 200 – 400 m y se acuña en el borde meridional del distrito (Geyne et al., 1963).

**Relaciones estratigráficas:** Una discordancia erosional importante, con una marcada relación angular con la formación subyacente [Formación Santa Gertrudis], se halla en la base de

la Formación Vizcaína. Esta discordancia es la más antigua de naturaleza angular que se piensa existe en la sucesión volcánica terciaria del distrito minero. Durante el período de erosión representado por la discordancia basal, ciertas partes de las tres formaciones anteriores [formaciones Santa Gertrudis, Real del Monte y Pachuca] fueron removidas localmente. Como resultado, la Formación Vizcaína descansa sobre horizontes diferentes de la Formación Santa Gertrudis en las partes central y nororiental del distrito, así como parcialmente sobre la Formación Real del Monte en las partes suroriental y noroccidental del distrito y localmente sobre la Formación Pachuca en la parte suroccidental del distrito. (Geyne et al., 1963, pág. 44)

**Edad y correlación:** Según los autores De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta, & Sánchez Bermeo (1995), en la columna geológica, la colocan en la edad Miocena. Su correlación no ha sido documentada.

**Ambiente de depósito:** Geyne et al. (1963), menciona que son derrames de composición andesítica y dacítica, por lo que, se infiere un ambiente volcánico de magmas intermedios.

#### **II.2.1.2.6. Formación Cerezo**

**Definición:** Geyne, Fries, y Probert (1963) mencionan que: consta principalmente de derrames, brechas de derrame y capas volcánicas epiclásticas, con algo de brecha volcánica y brecha tobácea, todo de composición variable de riolítica a riodacita, por lo general, estas rocas se han denominado “riolita” (...), el nombre se propone, según la localidad del pueblo Cerezo. (pág. 47)

**Distribución:** Aflora en áreas aisladas diseminadas del distrito, las áreas más grandes corresponden a las partes noroccidental y suroriental del distrito, sin embargo, la formación falta en la parte nororiental, aunque reaparece más allá del límite del mapa, al norte de Real del Monte

(...) en otros lugares falta entre las unidades sub y sobreyacientes, aflora extensamente en las cercanías de El Chico. (Geyne et al., 1963, pp. 47 y 48)

**Litología y espesor:** Se compone de tres tipos litológicos, el primero de material volcánico epiclástico (ubicado parcialmente en las cercanías de Tezuantla en la parte suroriental del distrito), el segundo de lava masiva con estructura fluidal (expuestas al noreste del tiro Nuevo Cuauhtémotzin) y por último capas de brecha de derrame (en la cumbre del cerro ubicado en las coordenadas 11, 500N – 10,500 E), la composición general es de riolítica – riodacítica. El espesor máximo es de unos 220 m, se ubica en la parte noroccidental del distrito, casi directo al norte de Pachuca, en otros lugares, su espesor máximo es de 50 – 120 m (Geyne et al., 1963).

**Relaciones estratigráficas:** Según Geyne et al. (1963), enuncia que, “La unidad sobreyace a la Formación Vizcaína y a rocas más antiguas, con una marcada discordancia angular, en la parte meridional del distrito, por ejemplo, localmente descansa sobre las formaciones Santa Gertrudis, Real del Monte y Pachuca”. (pág. 47)

**Edad y correlación:** Según los autores De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta, & Sánchez Bermeo (1995), la colocan en la columna geológica como edad Miocena, posiblemente Miocena Tardía. Su correlación no ha sido documentada.

**Ambiente de depósito:** Según Geyne et al. (1933), debido a las rocas se infiere, un ambiente volcánico de magmas ácidos.

#### **II.2.1.2.7. Formación Zumate**

**Definición:** Segerstrom (1961, 1962) propone el término de Formación Zumate, el nombre propuesto es debido al cerro Zumate, ubicado 3 km al norte del Real del Monte, posteriormente Geyne, Fries, y Probert (1963) lo definen para una sucesión de derrames, brechas de derrame, aglomerados y rocas volcánicas epiclásticas de composición dacítica.



**Distribución:** La Formación Zumate ocupa parcialmente la parte norte de Pachuca-Real del Monte extendiéndose por una distancia aprox. de 6 km hacia El Chico, también continúa hacia el noreste, formando parte de la cresta de la Sierra de Pachuca (Geyne et al., 1963).

**Litología y espesor:** Las rocas de la unidad son lavas con textura porfídica, con formas erosionables de pináculos, ubicados por Los Cerros Frailes, Cerro de las Monjas y Peña de las Ventanas (Segerstrom, 1961). Por otro lado, Geyne et al. (1963), describe a la unidad comenzando por su base, que son rocas clásticas, que contienen detritos andesíticos, dacíticos y riolíticos más antiguos que ésta formación, con una variada textura, desde limolitas a arenisca tobácea, brechas y conglomerados volcánicos gruesos, más arriba de la base se tienen capas lenticulares locales de brecha volcánica y forman una pequeña parte de la formación, sin embargo, la mayor parte se constituye de rocas de derrame arriba de su base clástica, distinguiéndose por su gran tamaño en los fenocristales de feldespatos de 15 mm de largo, en la localidad tipo, se tiene rocas de color púrpura rojizo grisáceo de estructura fluidal, y su parte más alta está representada por aglomerados de grano grueso y depósitos de lahares de composición dacítica y andesítica, el espesor original de la formación no se conoce, pero se estima unos 500 m hacia el norte de Pachuca-Real del Monte, con espesores variados de 50 m en sus flancos.

**Relaciones estratigráficas:** Se tiene una discordancia por un cambio de pendiente suave (Formación Vizcaína) a fuerte (Formación Zumate) a lo largo del contacto por una distancia de 6 km entre el Pueblo de Cerezo y Peña del Zumate (Geyne et al., 1963). Sin embargo, los autores Sánchez Rojas, Arredondo Mendoza, y Cardoso Vázquez (2007) mencionan que, sobreyace en discordancia erosional a las formaciones Cerezo y Tezuantla en la carta geológico-minera.

**Edad y correlación:** La edad según la columna geológica propuesta por Sánchez Rojas et al. (2007) proponen una edad Miocena Media-Tardía. La correlación según El autor Federico

Mooser (comunicación escrita, 1956; Segerstrom, 1962, pág. 115) menciona que: Las series dacita del Chiquihuite de la Sierra de Guadalupe justo al norte de la Ciudad de México y El Ajusco y las series andesita Iztaccíhuatl al suroeste y este de la Ciudad de México, son probablemente equivalente en edad a las formaciones Zumate, Tezuantla y tufa Don Guinyó.

**Ambiente de depósito:** De acuerdo con Geyne et al. (1963), se infiere para su parte basal un ambiente de derrame volcánico de magmas intermedios, mientras que su cima se propone el término de un ambiente de tipo volcánico “*alluvio-lahar*”.

#### **II.2.1.2.8. Formación Tarango**

**Definición:** Los autores De Terra, Arellano y Bryan, en un artículo publicado por Bryan (1948), proponen el nombre de la Formación Tarango, debido a la localidad ubicada a 4 km hacia el suroeste de Mixcoac, Ciudad de México).

**Distribución:** Bryan (1948) indica que se localiza al suroeste de Mixcoac, y también hacia el sur y oeste de la Ciudad de México. Segerstrom (1962) menciona que se encuentra en el Altiplanicie Mexicano, bajo la cuenca de México, una de las partes más bajas entre Huehuetoca y El Salto a 2,280 msnm o 40 m sobre la superficie del lago Texcoco, también hacia el este de Zumpango y Tequiaquiac, se ubica además en Hidalgo, en el Tajo de Nochistongo, al norte de la división del Valle del Mezquital, hacia el norte de Ixmiquilpan-Tasquillo, y al sur de Actopan-Tula.

**Litología y espesor:** En el trabajo de Kirk (1948) se menciona que, la litología está compuesta de 300 – 400 m de toba, aglomerado, grava volcánica de origen fluvial y capaz delgadas de pómez. Arellano (1953; citado en Segerstrom, 1962) menciona que en la localidad tipo son rocas en parte de lahares o flujos de lodo y coalescentes abanicos aluviales, y unos pequeños lentes de lava basáltica ocurren cerca de la cima de la formación en Actopan, Hidalgo.

Cervantes-Medel & Armienta (2004) describen más detallada la formación en el Valle del Mezquital como: 1) arenisca pobremente cementada y gravas en la superficie con 5 m de espesor; 2) arenisca pobremente cementada y arcillas con un promedio de espesor de 7m generalmente acuñado con otras capas; 3) capas de arcilla clástica con un espesor entre 10 a 50 m; 4) diversas capas basálticas alteradas y fracturadas, acañas o interestratificadas con unidades de escombros de aproximadamente 150 m de profundidad; 5) pequeños lentes de 1 m de conglomerado o grava no muy compacta; 6) lentes de caliza porosa lacustre aislada; 7) delgados lentes volcánicos, resultado desde la actividad volcánica contemporánea, y tobas de grano fino resultado de la erosión de tobas viejas; 8) Caliche como nódulos o como pequeñas capas heterogeneamente mixtas entre capas superficiales o en relación con fallas o fracturas en profundidad. En el área de Ixmiquilpan-Tasquillo, Hidalgo, los depósitos clásticos tienen un espesor total máximo de 400 m en escarpes, contrarios en el área de Actopan-Tula, donde las capas no están tan profundamente diseccionadas (Seegerstrom, 1962).

**Relaciones estratigráficas:** Cervantes-Medel & Armienta (2004), mencionan que: “Los sedimentos de la Formación Tarango fueron depositados sobre una superficie de erosión desarrollada sobre calizas cretácicas o rocas volcánicas terciarias” (pp. 479 y 480).

**Edad y correlación:** Jiménez (1977; citado en Trujillo Candelaria, 1977), por un estudio de diatomeas, asignó para esta formación una edad Pliocena Media-Pleistocena Tardía. Sin embargo, en un estudio por diversos autores (Fries, 1962, Castillo Cerón y Carranza Castañeda, 1994; citado en Suter, López Martínez, Quintero Legorreta y Carrillo Martínez, 2001), “consideran que la parte superior de la Formación Tarango, basado sobre su fauna, es del período Cuaternario” (pág. 697). Además, Suter et al. (1995a; citado en Suter et al., 2001) asigna que, la Formación Tarango es más joven que 7.1 Ma [edad Messiniana] basado en una edad de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

en toda la roca de la parte superior del flujo más joven de los basaltos subyacentes a la Formación Tarango en los Ajibes semi-graben (pág. 698). La correlación (Seegerstrom, 1962) es equivalente con la Formación Atotonilco El Grande, en tiempo, por otro lado, Suter et al. (2001) correlaciona los basaltos del semigraben de Ajibes tentativamente con los depósitos lacustres de la Formación Tarango que los cubren en la región Tula-Ixmiquilpan-Tasquillo. Según Huizar-Álvarez, Campos-Enríquez, Lermo-Samaniego, Delgado-Rodríguez, & Huidobro-González (1997) mencionan que la Formación Calpulalpan en las subcuencas de Apan y Tochan, es similar a la Formación Tarango.

**Contenido paleontológico:** Se encontraron restos de mamíferos en los valles de Actopan e Ixmiquilpan de los géneros *Mastodon* y *Equus*, también micromamíferos de la época Pleistocena del género *Cryptotis sp.*, de los sedimentos fluviales en Actopan-Ixmiquilpan y Pachuca-Tulancingo, *Cratogeomys castanops* y *Cratogeomys cf. merriami* en Actopan-Ixmiquilpan, y en Actopan se tienen restos de *Thomomys umbrinus* (González-Rodríguez, Cuevas-Cardona, & Castillo Cerón, 2009).

**Ambiente de Depósito:** Bryan (1948), menciona que es de un ambiente lacustre. Seegerstrom (1962) menciona que la formación es de un ambiente abanico aluvial en la cuenca de México, ambiente deltaico por la estratificación cruzada de areniscas en Chilcualtla al oeste de Ixmiquilpan, Hidalgo. Algunas capas de travertino en la Formación Tarango muestran la mineralización de pirolusita, que es típico de un ambiente lacustre oxidante (Cervantes-Medel & Armienta, 2004).

#### **II.2.1.2.9. Formación San Cristóbal**

**Definición:** Se incluyó en el grupo San Juan nombrado por B. W. Wilson (como se citó en Seegerstrom, 1961). Seegerstrom menciona que se conoce como “basalto San Cristobal”, para



este grupo se incluye tobas, lavas basálticas y conglomerados con guijarros de andesitas y riolitas más antiguas, esto desde el Río Tula hasta la Sierra de Pachuca, del Estado de Hidalgo.

**Distribución:** Se distribuye en la Sierra de Pachuca, la ciudad de Tula, Cerro del Gorrión, Cerro de los Pitos, Cerros de la Palma y Xicudo, también en los ríos de Ameztlán y Amaja, en el Estado de Hidalgo (Segerstrom, 1961; Geyne, Fries, y Probert, 1963).

**Litología y espesor:** Según Geyne et al. (1963), se constituye de derrames de lava y localmente presenta capas clásticas basales, mezclada con material volcánico erosionados de las formaciones subyacentes. Su espesor es variable de 60 a 100 m en el cerro del mismo nombre, y de 10 a 120 m en el Cerro de Cubitos; alcanza 250 m en el alto cerro ubicado al oriente de Azoyatla y fuera del distrito minero de Pachuca en el valle de Meztitlán puede exceder los 300 m.

**Relaciones estratigráficas:** Descansa discordantemente sobre las formaciones Zumate, Tezuantla, Cerezo y Vizcaína y fuera de la ciudad minera de Pachuca, descansa sobre rocas cretácicas (Geyne et al., 1963).

**Edad y correlación:** Segerstrom (1961) sugiere por relación estratigráfica una época Pliocena. Al noreste de la misma ciudad, se interdigita con la Riolita Navajas, la Formación Atotonilco y se sugiere un cambio lateral de facies con la Formación Tarango (Geyne et al., 1963).

**Ambiente de Depósito:** Se propone un ambiente de tipo volcánico, y por posición estratigráfica, se sugiere a la asociación de un lago, debido a la sobreposición en la Formación Tarango.

#### ***II.2.1.2.10. Toba Cubitos***

Geyne, Fries, y Probert (1963) proponen el nombre de Toba Cubitos para una sucesión delgada de capas piroclásticas de composición máfica, sobreyacen discordantemente a la Formación San Cristobal, en el Cerro Cubitos, en la parte suroccidental de la ciudad de Pachuca, Hidalgo. El espesor total no está expuesto, sin embargo, en el flanco suroriental del cerro con el mismo nombre se cubre por aluvión y cuenta con 30 m de espesor. En ciertos sitios las capas basales de la toba consisten en arenas volcánicas depositadas por el agua, con partículas de pómez blanca. Ésta sucesión está cubierta por material piroclástico basáltico y su edad parece corresponder al Pleistoceno medio. Estos depósitos de ceniza también se interdigitan con aluvión o están parcialmente cubiertos por aluvión, de manera parecida a la Toba Cubitos.

#### **II.2.2. Geología estructural.**

En el siguiente mapa estructural (véase Fig. II-6) basado según los autores de las cartas geológico-minera F14-D71 (De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta y Sánchez Bermeo, 1995) y F14-D81 (Sánchez Rojas, Arredondo Mendoza y Cardoso Vázquez, 2007) se divide en 4 partes: En la parte noroeste presenta un relieve de planicie con baja pendiente, en la que predomina un fracturamiento en las rocas (del período Neógeno) NW – SW sin una gran deformación y se disponen a la forma de su superficie, originadas por el Cinturón Volcánico Transmexicano; en la parte contraria hacia el noreste se puede observar que consiste de estructuras anticlinales y un sinclinal recumbentes, encontrándose el Anticlinorio Cerro Blanco formado posiblemente por la orogenia Laramide, éstas rocas cretácicas tienen una dirección de fracturamiento preferente de NW – SE con una disposición espacial diversa, y teniendo una porción alta en la división montañosa que direcciona en el bajo al río Amajac; en el suroeste se tiene la parte horizontal donde radica la ciudad de Actopan con estructuras planas a semiplanas



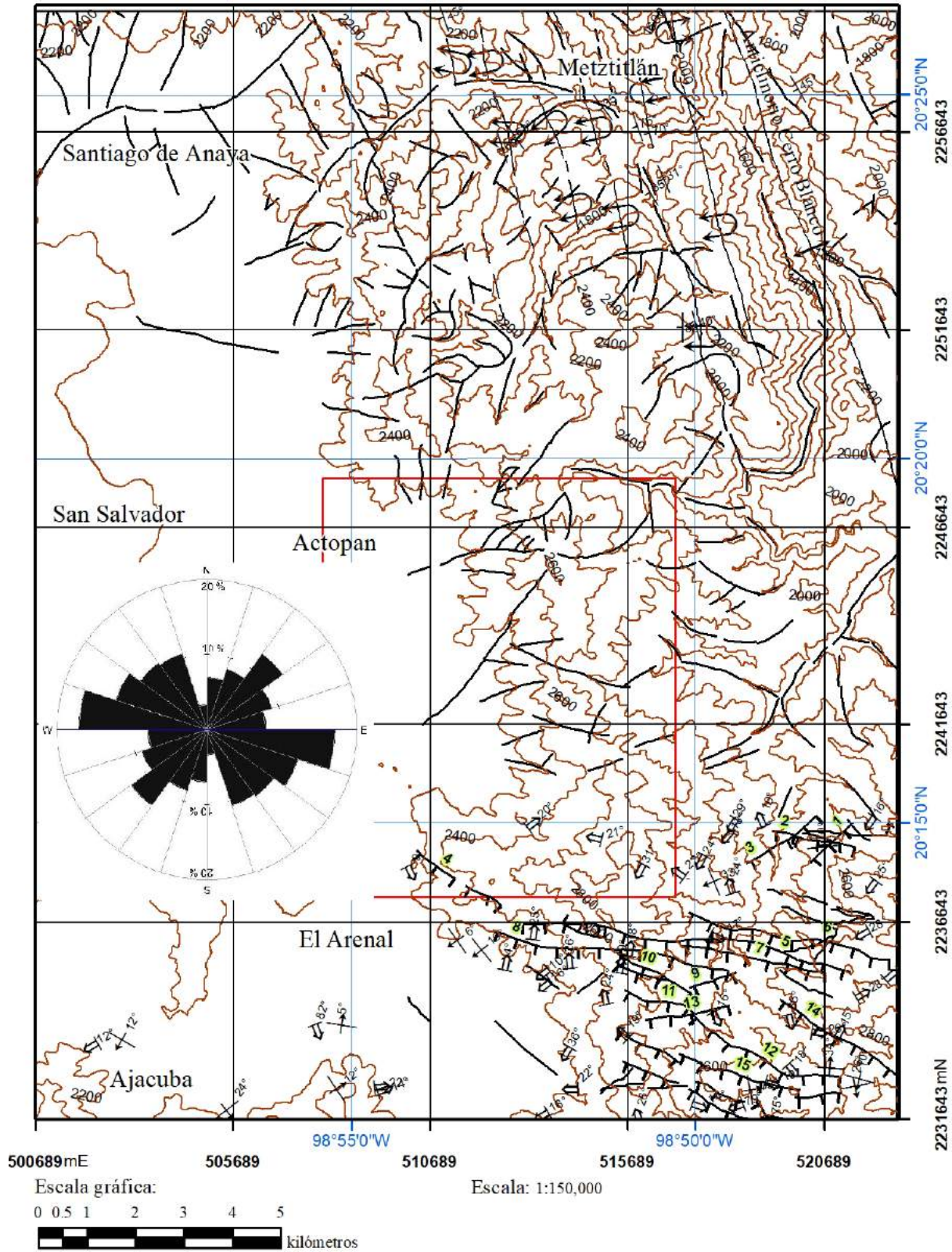














Figura II-6. Mapa estructural. Elaboración propia basada en las cartas geológicas mineras F14-D71 y F14-D81.

### Simbología

Datos estructurales	Fallas y fracturas
 Rumbo y echado	 Anticlinal recumbente
 Flujo de lava	 Anticlinorio
 Pseudoestratificación	 Falla Normal
 Fractura medida	 Falla normal inferida
 curvas de nivel @ 200m	 Fractura
	 Sinclinal recumbente
	 Área de estudio

de la erosión de las capas volcánicas del Neógeno con muy poco fracturamiento, colindando con el municipio El Arenal y definiendo más hacia el sur-suroeste, se tiene una estructura volcánica altamente porosa

(perteneciente a la Formación Toba Cubitos [inferida]) de roca pumicita con un flujo de lava y pseudoestratificación de  $10^{\circ}$  –  $30^{\circ}$  de buzamiento; finalmente hacia la parte sureste, se encuentran rocas volcánicas del Neógeno altamente fracturadas con una dirección NW – SE, presenta pseudoestratificación y flujos de lava, es la zona más alta del mapa colindando con los municipios El Arenal y Mineral el Chico, al principio del afluente del Río Amajac se tienen las siguientes fallas (véase los números de la Fig. II-6): 1) El Jaspe, rumbo  $47^{\circ}$  NE, echado  $78^{\circ}$  SE; 2) Los Rojas, rumbo  $81^{\circ}$  NW, echado  $81 - 85^{\circ}$  SW; 3) Valeria, rumbo  $55^{\circ}$  NE, echado  $85^{\circ}$  SE; 4) El Colmillo, rumbo  $60^{\circ}$  NW, echado  $85^{\circ}$  SW; 5) Capula Arevalo Poniente, rumbo  $79^{\circ}$  NW, echado  $79^{\circ}$  S – SW; 6) Cimbrones, rumbo  $77^{\circ}$  NW, echado  $83^{\circ}$  SW; 7) Manzanas II, rumbo  $80^{\circ}$  NW, echado  $78 - 82^{\circ}$  SW; 8) La Trinidad, rumbo  $80^{\circ}$  NW, echado  $66^{\circ}$  SW; 9) San Felipe, rumbo  $72^{\circ}$  NE, echado  $45^{\circ}$  SE; 10) Santa Cruz, rumbo  $63^{\circ}$  NW, echado  $68 - 81^{\circ}$  SW; 11) Aviadero, rumbo  $78^{\circ}$  NW, echado  $79^{\circ}$  SW; 12) Zumbimbliá, rumbo  $60^{\circ}$  NW, echado  $78 - 88^{\circ}$  SW; 13) Santo Niño, rumbo  $82^{\circ}$  NE, echado  $76^{\circ}$  SE; 14) Estanzuela, rumbo  $57^{\circ}$  NW, echado  $78^{\circ}$  SW y 15) San José, rumbo  $72^{\circ}$  NW, echado  $81^{\circ}$  SW.



### Capítulo III. Hidrología

En este capítulo refiere a la aplicación de la hidrología, primeramente, describiendo las cuencas hidrográficas que componen el área de estudio y zonas aledañas, después se expresan los parámetros morfométricos de las unidades adquiridas, que van desde lo general (su geometría y forma), el relieve (las pendientes y topografía) y drenes (la red fluvial y sus magnitudes). También se presentan los factores como la precipitación, evapotranspiración, escorrentía y la infiltración, con ello demostrando un balance hidrológico local, y una buena caracterización del agua superficial.

### III.1. Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es: Una depresión en el relieve terrestre, drenado por un único sistema de drenaje natural, en la que tiene su salida a otro sistema hídrico (río, mar, otra cuenca, entre otros) en la que se delimita por las aristas del terreno alto y divide la dirección del flujo de agua (llamados parte agua) (Universidad José Cecilio del Valle [UJCV], 2011).

Sin embargo, existe una diferencia entre una cuenca hidrológica, la cual es que una cuenca hidrográfica se refiere solamente al agua superficial, mientras que la otra vincula al agua subterránea (Velarde, 2012).

Dentro del territorio nacional se halla la región hidrográfica “Pánuco” (clave RH26), en ella se localiza la cuenca hidrográfica “Río Moctezuma” (clave RH26D) cubriendo la mayoría del Estado de Hidalgo con un área de 42,889.94 km<sup>2</sup>, se clasifica en exorreica (cuyo río principal desemboca al Golfo de México). Dentro del área de estudio se encuentran las siguientes subcuencas hidrográficas (CONABIO, 2001):

Río Actopan (clave RH26Dr) cubriendo el 71.30 % (67.66 km<sup>2</sup>), clasificada en abierta de tipo media-alta (comprende una zona de pie de monte y montañosa), presenta su salida de agua a la subcuenca Río Tula (INEGI, 2010). Según Piñeiro Ramírez (2011) “La mayor parte de su caudal es utilizado para la irrigación de tierras agrícolas en el Valle Ixmiquilpan y para abastecimiento de la presa Dobodhé, que tiene una capacidad de 5.4 millones de metros cúbicos” (pág. 15).

Río Amajac (clave RH26Ds) con el 28.70 % (27.24 km<sup>2</sup>), clasificada en abierta de tipo alta (comprende una zona montañosa), presentando su salida hacia la subcuenca Río Moctezuma (clave RH26Da) (INEGI, 2010).

### III.2. Parámetros morfométricos de las unidades hidrográficas

En términos hidrográficos, una cuenca tiene la cualidad de ser un sistema natural, que permite la colección de agua a través de la precipitación, y depende de las condiciones climáticas y sus características físicas. Para conocerlas se necesitan parámetros morfométricos, que son las magnitudes cuantitativas estimadas de las peculiaridades físicas de una cuenca, que permite el análisis de la red de drenaje, pendientes y forma, con fines de aprovechamiento sobre el recurso (Lux Cardona, 2016).

#### III.2.1. Parámetros generales (véase resultados Tabla III-3).

El área ( $A$ ) de una cuenca se define como la proyección horizontal de la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía direccionado a un mismo dren natural, y generalmente se expresa en  $\text{km}^2$ . En la zona de estudio y aledañas se analizaron exhaustivamente los drenes contenidos para la delimitación hidrográfica, en la cual se clasificaron (Jiménez Maretón, 1986; como se citó en Reyes Trujillo, Ulises Barroso y Carbajal Escobar, 2014) en dos microcuencas, dos sectores y dos unidades.

De acuerdo con los estudios realizados (Lux Cardona, 2016; Cahuana Andia y Yugar Morales, 2009; Sellers, Buján, Corbelle y Miranda, 2017) la morfometría de una cuenca se compone de los siguientes parámetros:

- Perímetro ( $P$ ): Es la longitud del contorno sobre un plano horizontal que recorre la divisoria de agua, normalmente se expresa en metros o kilómetros.
- Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius ( $kc$ ): Es el coeficiente que existe entre el perímetro de la cuenca respecto al perímetro de un círculo del área de la misma, es

decir,  $kc = \frac{P}{P_0} \therefore \frac{P}{2\sqrt{\pi*A}} = 0.282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$ , este parámetro dará una idea de la forma de la cuenca.



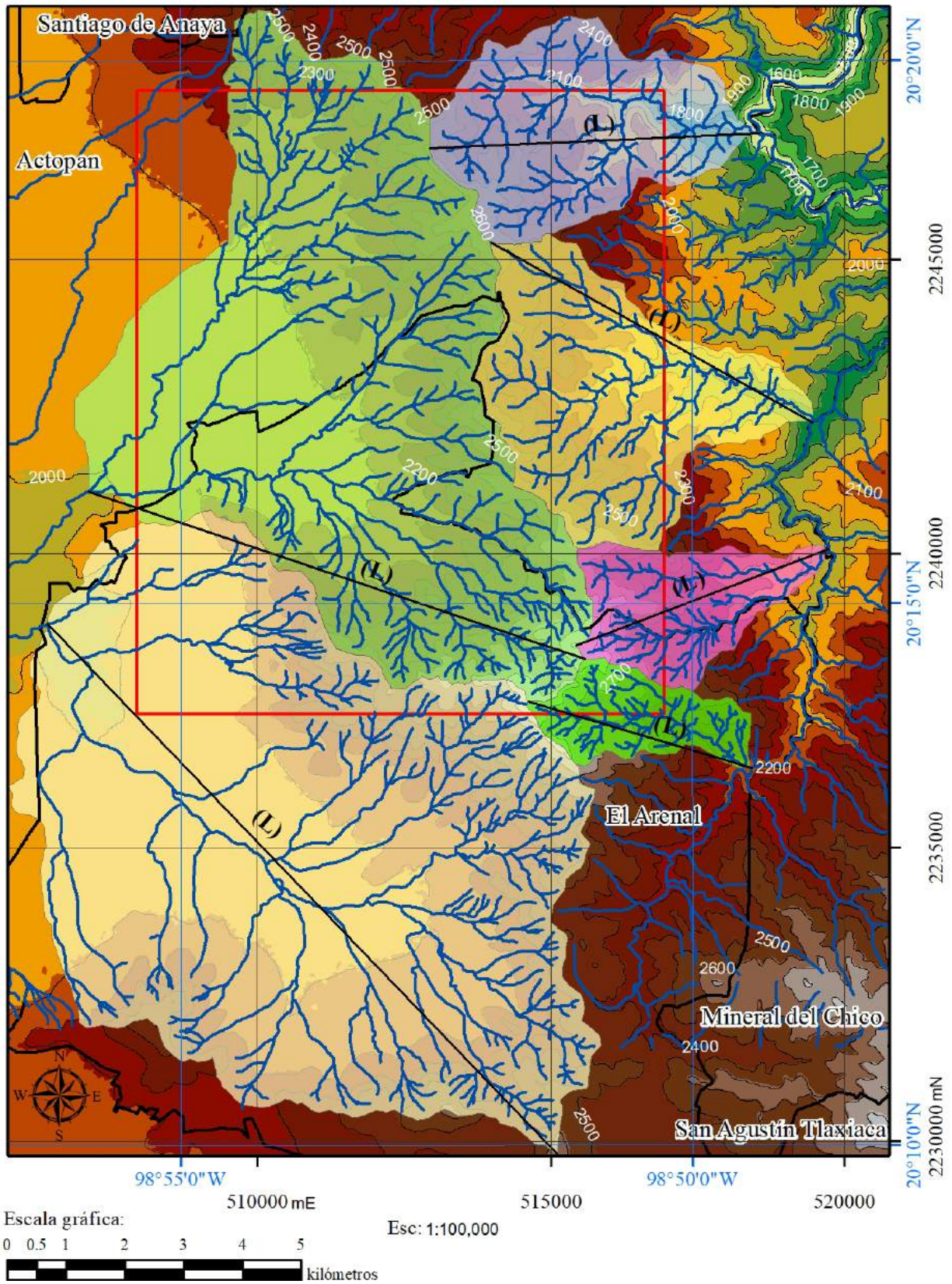


Figura III-1. Representación de las microcuencas, sectores y unidades del área de estudio. Elaboración propia.



### Simbología

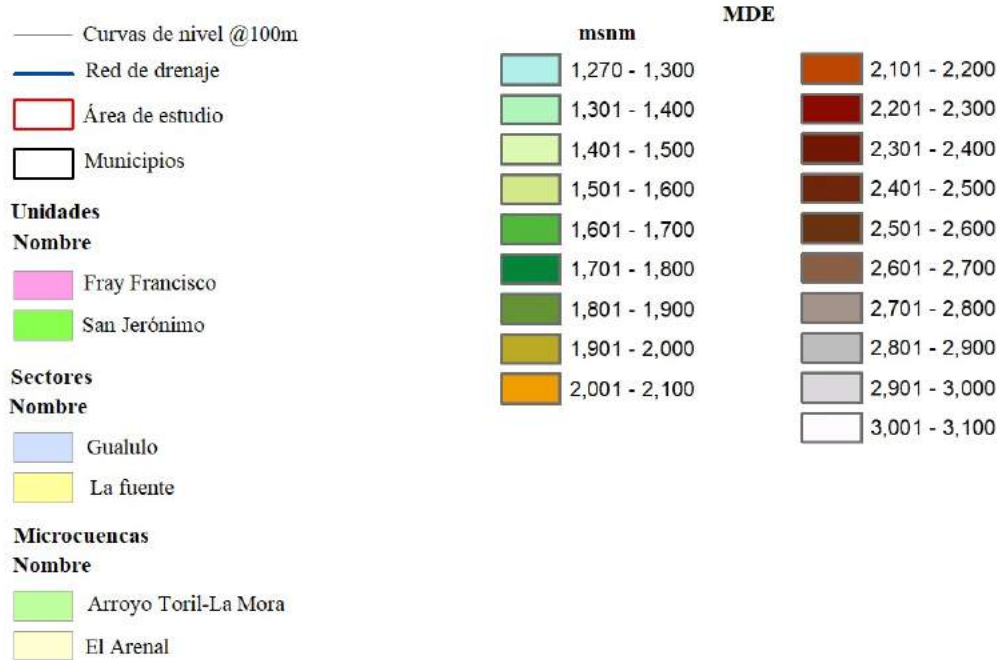


Tabla III-1. Índice de compacidad (Sellers, Buján, Corbelle, & Miranda, 2017, pág. 405)

Índice kc	Descripción
1 – 1.25	Redonda – ovalo redonda
1.25 – 1.5	Ovalo redonda – ovalo oblonga
1.5 – 1.75	Ovalo oblonga – rectangular oblonga
> 1.75	Rectangular oblonga – Muy lobuladas

la cuenca. Es el eje de la cuenca.

- Longitud de la cuenca ( $L$ ): Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (punto de desfogue) hasta el punto más lejano de la cuenca.
- Ancho promedio de la cuenca ( $W$ ): Se define como la relación del área y la longitud de la cuenca,  $W = \left(\frac{A}{L}\right)$ .
- Forma de la cuenca ( $F_f$ ): Definido por Horton, como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud del cauce principal, es decir,  $F_f = \frac{W}{L} \therefore = \frac{A}{L^2}$ , esta ecuación muestra la interrelación que existe entre el área y la morfología de una cuenca, bajos valores indican formas alargadas, mientras que los altos de carácter achatado.

Tabla III-2. *Relación forma Horton (Sellers, Buján, Corbelle, & Miranda, 2017, pág. 404)*

Rango de valores	Forma de la cuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.12	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

• Relación de elongación ( $R_e$ ):

Definido por Schumm, es la relación entre el diámetro de un círculo ( $D$ ) de área igual a la cuenca y la longitud de la cuenca ( $L$ ), es decir,  $R_e = \frac{D}{L}$ ,

expresando el diámetro en función del

área de la cuenca ( $A$ ) queda:  $R_e = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{L}$ . Si  $R_e$  varía entre 0.60 y 1.00 cuenca con amplia variedad de climas y geología. Y se correlaciona fuertemente con el relieve, de manera que, valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieve bajo y entre 0.60 a 0.80 asociado a fuertes relieves y pendientes pronunciadas.

- Relación de circularidad ( $R_{ci}$ ): Es el cociente entre el área de la cuenca ( $A$ ) y la del círculo cuyo perímetro ( $P$ ) es igual al de la cuenca,  $R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2}$ , cuando el valor es una unidad la cuenca es circular y cuando es 0.785 la cuenca será cuadrada.

Tabla III-3. *Resultados de los parámetros generales de las cuencas en el área de estudio. Elaboración propia.*

Unidades hidrográficas	Microcuenca Arroyo Toril-La Mora	Microcuenca El Arenal	Sector Gualulo	Sector La Fuente	Unidad Fray Francisco	Unidad San Jerónimo
Área ( $A$ ) [km <sup>2</sup> ]	55.3487	73.7899	13.3255	16.5502	6.5327	4.3143
Perímetro ( $P$ ) [km]	36.8300	38.3423	15.9914	19.5130	12.3713	10.3853
Coefficiente de Gravelius ( $kc$ ) [km]	1.3965	1.2591	1.2358	1.3531	1.3654	1.4105
Forma ( $kc$ )	Ovalo oblonga	Ovalo redonda	Ovalo	Ovalo oblonga	Oblonga a rectangular	Oblonga rectangular
Longitud ( $L$ ) [km]	8.9123	12.4969	5.6077	6.2627	4.5959	3.9736

Ancho promedio ( $W$ ) [km]	6.2104	5.9047	2.3763	2.6427	1.4214	1.0857
Factor de la cuenca ( $F_f$ ) [ADIM]	0.6968	0.4725	0.4238	0.4220	0.3093	0.2732
Forma ( $F_f$ )	Ensanchada	Ligeramente ensanchada	Ligeramente ensanchada	Ligeramente ensanchada	Ligeramente alargada	Alargada
Relación de elongación ( $R_e$ ) [ADIM]	0.9419	0.7756	0.7345	0.7330	0.6275	0.5898
Relación de circularidad ( $R_{ci}$ ) [ADIM]	0.5128	0.6307	0.6548	0.5462	0.5364	0.5027
Elevación mínima [msnm]	1981	1980	1553	1726	1896	2149
Elevación máxima [msnm]	2905	2876	2637	2705	2905	2874
Diferencia de elevación ( $DE$ ) [msnm]	923.6626	895.8926	1084.1967	978.5249	1008.9342	724.8412
X centroide [m]	511424.3719	510823.0760	515598.8589	516305.4234	517391.2444	516495.6762
Y centroide [m]	2243114.8394	2235148.2301	2247210.2454	2242704.2004	2239037.9060	2237253.0152
Z centroide [msnm]	2437	2405	2218	2302	2442	2578
Red de drenaje	Dendrítica tributaria	Dendrítica	Subdendrítica	Dendrítica	Dendrítica	Dendrítica

### III.2.2. Parámetros del relieve (véase resultados en la Tabla III-6).

De acuerdo con Sellers, Buján, Corbelle y Miranda (2017) es de suma importancia obtener los parámetros del relieve, ya que presentan más influencia sobre el comportamiento hidrológico, relacionado con la pendiente, de manera que a mayor sea, los procesos de escorrentía se producen en tiempos menores. A continuación, se muestran los más relevantes:

- Pendiente media de la cuenca ( $P_M$ ) (véase Tabla III-4): Es la inclinación promedio del relieve de una cuenca, relacionado con el caudal máximo, debido a que la erosión se

manifiesta de mayor o menor grado de acuerdo con las distintas pendientes que se presentan.

Existen distintos métodos para obtener la pendiente media de una cuenca, uno de los más comunes en el ámbito digital, es la interpolación por forma (*Interpolate Shape*) para los *softwares* en la cartografía digital, este comando crea entidades 3D interpolando los valores *z* de una superficie (en este caso las unidades hidrográficas) y un vector, para así, poder generar una tabla de estadísticas de las mediciones.

- Pendiente media del cauce (*j*): Es la magnitud de la inclinación del dren principal; que es la diferencia del desnivel que presenta el cauce entre su longitud y se relaciona con la velocidad de escorrentía, por lo que, cuanto mayor sea la pendiente, mayor velocidad de flujo, por tanto, es un factor característico del tiempo en respuesta de la cuenca ante determinada precipitación, expresada como:  $j = \frac{DE}{Ln}$ , y se representa generalmente en porcentaje, la ecuación quedaría como:  $j = \frac{DE}{Ln} * 100$  o en grados:  $j = \tan^{-1} \left( \frac{DE}{Ln} \right)$

Tabla III-4. Clasificación de la pendiente media. Basado en Sellers, Buján, Corbelle y Miranda (2017) y Figueredo Rodríguez (2017).

Pendiente media %	Tipología de terreno	Descripción	Procesos característicos
< 0.5	Muy plano	A un nivel horizontal a casi horizontal	Denudación no apreciable, es de objeto agrícola principalmente.
0.5 – 1.0	Plano		
1 - 3	Suave		
3 - 12	Accidentado medio	Ligeramente inclinado u ondulada a moderadamente	Erosión hídrica en las laderas.
12 - 20	Accidentado	Fuertemente inclinado u ondulada	Remoción en masa de todo tipo, esporádicamente deslizamientos por efectos hídricos
20 - 50	Fuertemente accidentado	Fuertemente quebrada a ligeramente escarpada	Procesos denudacionales intensivos, usualmente deslizamientos
50 - 75	Escarpado	Empinado asociado a fallas	Desprendimiento de rocas, asociado a estructuras como coluviones o derrubios
> 75	Muy escarpado	Muy empinado, incluye estructuras verticales	Caída de rocas por meteorización fisicoquímico y biológico, además de inferir el tectonismo de la zona

- Curva hipsométrica ( $H_c$ ) (véase Fig. III-2): Es la representación de la altura relativa (eje de las ordenadas), que es el promedio de la altitud de la cuenca o intervalos de la misma, y el área sobre la altura relativa (eje de las abscisas), que es el intervalo del área de una cuenca sobre el área total de la misma, es decir, el área acumulada, que se representa en porcentajes, considerada como una gráfica de análisis en la clasificación del tiempo y los factores de erosión del relieve en una unidad hidrográfica.

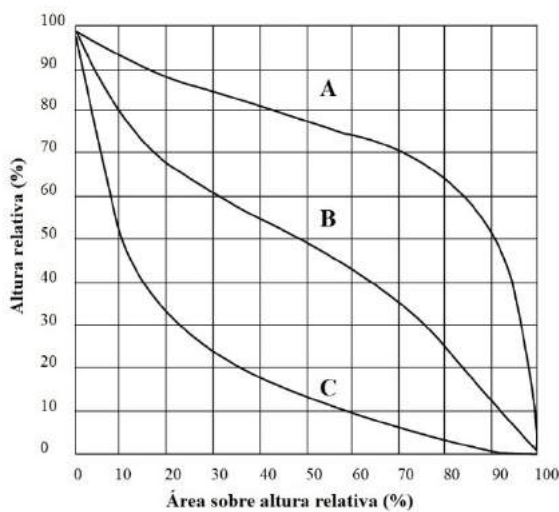


Figura III-2. Descripción de curva, modificada (Strahler 1954a, 353; citado en Strahler, 1957; Sellers, Buján, Corbelle y Miranda, 2017). Tipos de relieve; A) joven asociado a erosivo; B) maduro asociado a equilibrado; y C) viejo asociado a sedimentación.

- Histograma de frecuencias altimétricas: Es la representación de la superficie en  $\text{km}^2$  (o porcentaje), comprendida entre dos cotas. La representación de varios de estos niveles da lugar al histograma de frecuencias altimétricas.
- Longitud del cauce principal ( $L_n$ ): Es la sumatoria de la longitud que conforman el dren principal de la cuenca, que es el más largo, asociado a su clasificación en órdenes de drenaje.
- Elevación media ( $E_m$ ): Es la altitud promedio, definida como la sumatoria del área sobre la altura relativa entre la altura relativa, es decir: 
$$\frac{\sum(\text{Área acumulada}_n)}{\sum(\text{Elevación media}_n)}$$
 donde “n” es el número de la clasificación de los intervalos iguales.



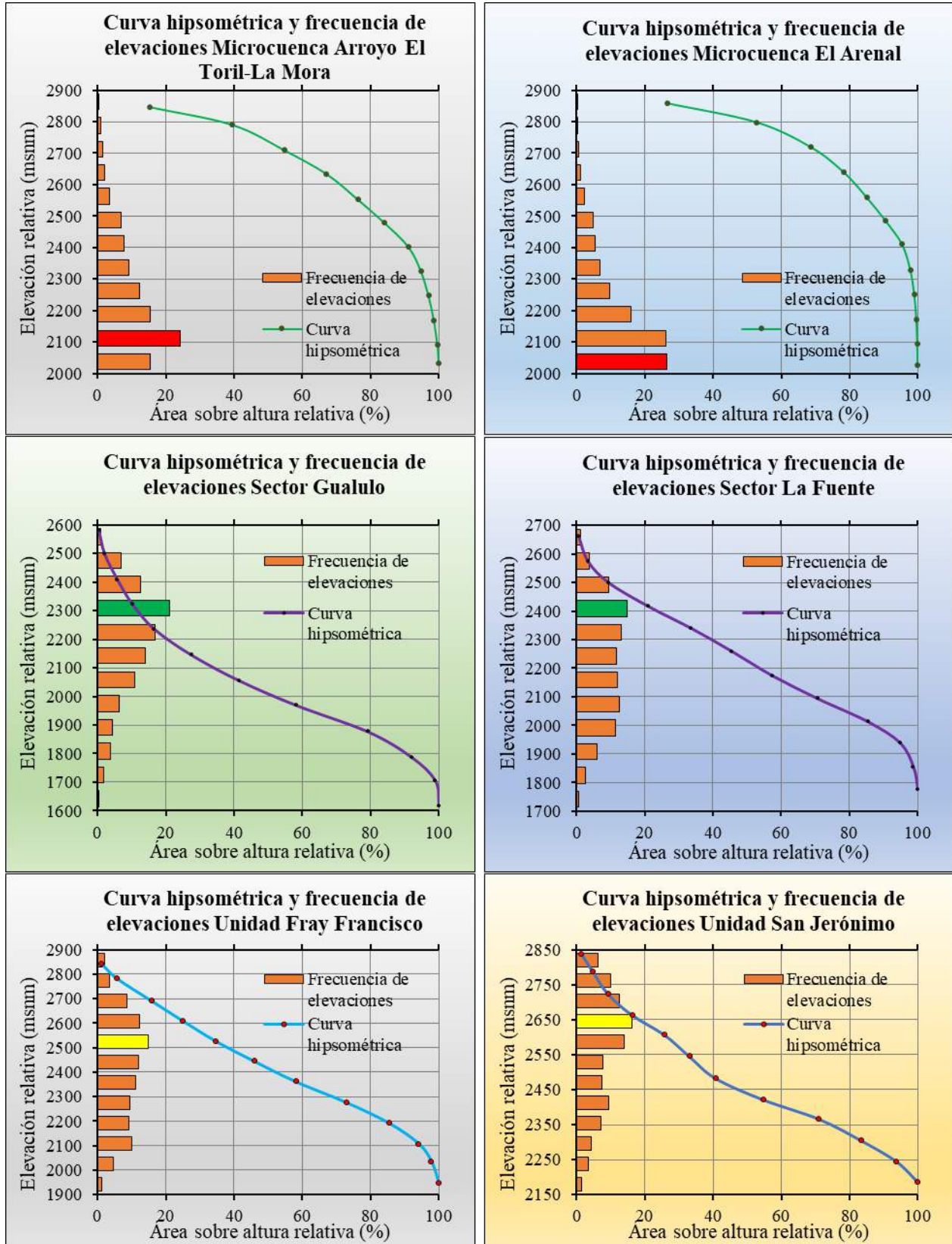


Figura III-3. Curvas hipsométricas e histogramas de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

Tabla III-5. Magnitudes de elevación-área de las unidades hidrográficas. Elaboración propia

	Valor	Cotas				Frecuencia		Área [km <sup>2</sup> ]				
		Intervalos de elevación [msnm]		Elevación media [msnm]	Elevación relativa (%)	Elevación relativa acumulada (%)	Frecuencia de elevaciones [ADIM]	Frecuencia de elevaciones (%)	Intervalo	Acumulado	Acumulado de mayor a menor (%)	Intervalo (%)
<b>Microcuenca Arroyo El Toril-La Mora</b>	1	1979	2056	2033.11	6.94	6.94	54662	15.40	8.49	8.49	100.00	15.35
	2	2057	2133	2091.47	7.14	14.08	85710	24.15	13.36	21.85	99.60	24.14
	3	2134	2210	2169.92	7.41	21.49	54661	15.40	8.53	30.38	98.54	15.41
	4	2211	2288	2247.99	7.68	29.17	43404	12.23	6.77	37.16	96.98	12.24
	5	2289	2365	2325.58	7.94	37.11	32690	9.21	5.10	42.25	94.76	9.21
	6	2366	2442	2402.55	8.20	45.32	27403	7.72	4.28	46.53	91.13	7.73
	7	2443	2519	2479.42	8.47	53.78	24954	7.03	3.90	50.44	84.07	7.05
	8	2520	2597	2552.59	8.72	62.50	12893	3.63	2.01	52.45	76.34	3.63
	9	2598	2674	2634.51	9.00	71.50	7857	2.21	1.23	53.67	67.13	2.22
	10	2675	2751	2709.23	9.25	80.75	5555	1.56	0.86	54.54	54.89	1.56
	11	2752	2828	2790.87	9.53	90.28	3764	1.06	0.59	55.13	39.48	1.06
	12	2829	2906	2847.26	9.72	100.00	1410	0.40	0.22	55.35	15.35	0.40
	Sumatorias:		29284.49	100		354963	100	55.35			100	
<b>Microcuenca El Arenal</b>	1	1979	2057	2025.88	6.90	6.90	784068	26.56	19.60	19.60	100.00	26.56
	2	2058	2135	2094.79	7.14	14.04	773054	26.18	19.32	38.92	99.92	26.18
	3	2136	2214	2170.99	7.40	21.44	471161	15.96	11.77	50.69	99.63	15.96
	4	2215	2292	2251.17	7.67	29.11	282073	9.55	7.05	57.74	99.02	9.56
	5	2293	2370	2329.15	7.94	37.05	199190	6.75	4.98	62.72	97.85	6.74
	6	2371	2449	2410.32	8.21	45.26	163719	5.55	4.09	66.81	95.43	5.55
	7	2450	2527	2485.70	8.47	53.73	144327	4.89	3.61	70.42	90.54	4.89
	8	2528	2605	2560.19	8.72	62.46	71265	2.41	1.78	72.20	85.00	2.41
	9	2606	2684	2640.17	9.00	71.46	34550	1.17	0.86	73.06	78.25	1.17
	10	2685	2762	2718.97	9.27	80.72	18127	0.61	0.45	73.52	68.70	0.61
	11	2763	2840	2798.23	9.54	90.26	8681	0.29	0.22	73.73	52.74	0.29
	12	2841	2919	2858.68	9.74	100.00	2272	0.08	0.06	73.79	26.56	0.08
	Sumatorias:		29344.24	100		2952487	100	73.79			100.00	
<b>Sector Gualulo</b>	1	1561	1650	1618.18	6.42	6.42	433	0.51	0.07	0.07	100.00	0.51
	2	1651	1740	1705.39	6.77	13.19	1433	1.68	0.22	0.29	98.98	1.69
	3	1741	1830	1787.85	7.09	20.28	3185	3.74	0.50	0.79	92.05	3.74
	4	1831	1920	1876.45	7.45	27.73	3766	4.42	0.59	1.38	79.36	4.41
	5	1921	2009	1969.39	7.81	35.54	5443	6.38	0.85	2.23	58.24	6.38
	6	2010	2099	2055.94	8.16	43.70	9219	10.81	1.44	3.67	41.49	10.82
	7	2100	2189	2145.41	8.51	52.21	11897	13.95	1.86	5.53	27.54	13.95
	8	2190	2279	2235.79	8.87	61.08	14282	16.75	2.23	7.76	16.72	16.75
	9	2280	2368	2322.00	9.21	70.29	18004	21.11	2.81	10.57	10.34	21.11
	10	2369	2458	2408.46	9.56	79.85	10822	12.69	1.69	12.26	5.93	12.69

	11	2459	2548	2498.10	9.91	89.76	5915	6.94	0.92	13.19	2.19	6.93
	12	2549	2638	2580.03	10.24	100.00	869	1.02	0.14	13.32	0.51	1.02
	Sumatorias:			25202.99	100		85268	100	13.32			100.00
Sector La Fuente	1	1727	1808	1777.54	6.68	6.68	757	0.71	0.12	0.12	100.00	0.72
	2	1809	1890	1855.17	6.97	13.65	2879	2.72	0.45	0.57	98.74	2.71
	3	1891	1971	1938.90	7.29	20.94	6513	6.15	1.02	1.59	94.89	6.15
	4	1972	2053	2013.49	7.57	28.51	12119	11.44	1.89	3.48	85.49	11.43
	5	2054	2134	2094.26	7.87	36.38	13411	12.66	2.10	5.58	70.74	12.67
	6	2135	2216	2174.12	8.17	44.55	12687	11.98	1.98	7.56	57.51	11.97
	7	2217	2297	2259.10	8.49	53.05	12551	11.85	1.96	9.52	45.66	11.85
	8	2298	2379	2340.21	8.80	61.84	14005	13.22	2.19	11.71	33.69	13.23
	9	2380	2460	2417.45	9.09	70.93	15627	14.75	2.44	14.15	21.02	14.76
	10	2461	2542	2498.70	9.39	80.32	9947	9.39	1.55	15.70	9.59	9.39
	11	2543	2623	2574.05	9.68	90.00	4084	3.86	0.64	16.34	3.44	3.85
	12	2624	2705	2661.31	10.00	100.00	1339	1.26	0.21	16.55	0.72	1.26
	Sumatorias:			26604.31	100		105919	100	16.55			100.00
Unidad Fray Francisco	1	1896	1980	1946.36	6.76	6.76	513	1.23	0.08	0.08	100.00	1.22
	2	1981	2064	2035.00	7.06	13.82	1915	4.58	0.30	0.38	97.83	4.60
	3	2065	2148	2106.26	7.31	21.13	4258	10.19	0.66	1.04	94.20	10.18
	4	2149	2232	2190.51	7.60	28.74	3826	9.15	0.60	1.64	85.61	9.15
	5	2233	2316	2274.74	7.90	36.64	4019	9.62	0.63	2.27	73.19	9.61
	6	2317	2400	2360.66	8.20	44.83	4709	11.27	0.74	3.00	58.22	11.27
	7	2401	2484	2443.90	8.48	53.32	5080	12.15	0.80	3.80	46.02	12.20
	8	2485	2568	2525.84	8.77	62.08	6274	15.01	0.98	4.78	34.75	14.97
	9	2569	2652	2608.17	9.05	71.14	5194	12.43	0.81	5.59	25.15	12.42
	10	2653	2736	2689.80	9.34	80.48	3582	8.57	0.56	6.15	15.99	8.59
	11	2737	2820	2781.70	9.66	90.13	1516	3.63	0.24	6.39	5.81	3.62
	12	2821	2905	2842.00	9.87	100.00	910	2.18	0.14	6.53	1.22	2.17
	Sumatorias:			28804.93	100		41796	100	6.53			100.00
Unidad San Jerónimo	1	2150	2210	2185.56	7.25	7.25	2611	1.51	0.07	0.07	100.00	1.51
	2	2211	2271	2244.65	7.44	14.69	5858	3.39	0.15	0.21	93.73	3.40
	3	2272	2331	2303.20	7.64	22.32	7572	4.39	0.19	0.40	83.66	4.38
	4	2332	2392	2366.05	7.84	30.16	12313	7.13	0.31	0.71	71.05	7.14
	5	2393	2452	2421.45	8.03	38.19	16096	9.32	0.40	1.11	54.76	9.32
	6	2453	2513	2482.38	8.23	46.42	12834	7.43	0.32	1.43	40.79	7.43
	7	2514	2574	2544.32	8.43	54.86	13141	7.61	0.33	1.76	33.18	7.61
	8	2575	2634	2607.28	8.64	63.50	24100	13.96	0.60	2.36	25.75	13.97
	9	2635	2695	2663.01	8.83	72.33	28119	16.29	0.70	3.06	16.43	16.29
	10	2696	2755	2723.40	9.03	81.35	21757	12.60	0.54	3.61	9.29	12.61
	11	2756	2816	2786.66	9.24	90.59	17389	10.07	0.43	4.04	4.91	10.07
	12	2817	2877	2838.07	9.41	100.00	10837	6.28	0.27	4.31	1.51	6.27
	Sumatorias:			30166.03	100		172627	100	4.31			100.00

Tabla III-6. Resultados de los parámetros del relieve de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

Unidades hidrográficas	Microcuenca Arroyo Toril-La Mora	Microcuenca El Arenal	Sector Gualulo	Sector La Fuente	Unidad Fray Francisco	Unidad San Jerónimo
Elevación media ( $E_m$ )	2235.4051	2180.1090	2203.8989	2239.6550	2410.5285	2582.9165
Elevación más frecuente	2091.4652	2025.8798	2321.9999	2417.4509	2525.8387	2663.0057
Pendiente media ( $P_M$ ) [%]	25.1220	23.6259	47.5603	42.3818	46.5258	53.3459
Clasificación de $P_M$	Fuertemente accidentado, denudación moderada	Fuertemente accidentado, denudación moderada	Fuertemente accidentado, denudación intensiva	Fuertemente accidentado, denudación intensiva	Fuertemente accidentado, denudación intensiva	Escarpado, desprendimiento de rocas
Longitud del cauce principal ( $L_n$ ) [km]	11.0029	14.8029	7.3993	7.5655	5.1582	4.4304
Z min. del cauce principal [msnm]	1986	1986	1561	1729	1896	2151
Z máx. del cauce principal [msnm]	2831	2540	2467	2411	2837	2833
De del cauce principal [msnm]	846	554	905	681	941	682
Pendiente media del cauce principal ( $j$ ) [%]	7.6862	3.7397	12.2346	9.0077	18.2408	15.3989
Clasificación de la $H_c$	Relieve joven con procesos erosivos	Relieve joven con procesos erosivos	Relieve maduro con procesos equilibrados	Relieve maduro, equilibrado (con procesos de muy baja erosión)	Relieve maduro con procesos equilibrados	Relieve maduro con procesos equilibrados

### III.2.3. Parámetros de drenaje (véase los resultados en la Tabla III-7).

La red de drenaje es un sistema de drenes (mecanismo que permiten la salida del agua a un organismo) naturales o artificiales que ceden paso de salida a la precipitación en alguna

entidad (ríos, lagos, lagunas, mares, entre otros) que en relación con su divisoria de agua dan origen a las cuencas. Es de gran relevancia la descripción de los parámetros de la red fluvial, ya que, proporcionan información esencial acerca de cómo se distribuye el agua superficial y su dependencia con el agua subterránea, por lo que, se podrán interrelacionar diversos factores para obtener una calidad en la cuantificación del agua. Por ello, se tomarán las siguientes medidas:

- Jerarquización de la red fluvial: Es el ordenamiento de las corrientes de agua en la clasificación de sus tributarios o afluentes. Propone que las puntas de los afluentes no ramificados son siempre de orden uno, los tributarios o corrientes de orden dos reciben afluentes de orden uno, pero éstos solamente; una corriente de orden tres debe recibir uno o más afluentes de orden dos, pero también reciben afluentes de orden uno. Una corriente de orden cuatro recibe afluentes de orden tres y usualmente también de ordenes más bajos y así sucesivamente (Horton, 1945, pág. 286).
- Densidad de corrientes ( $D_s$ ): De acuerdo con Aparicio Mijares (1989), definida como el número de corrientes perennes o intermitentes por unidad de área, expresada como:  
$$D_s = \frac{N_s}{A}$$
 donde “ $N_s$ ” es el número de corrientes perenne o intermitentes y “ $A$ ” el área de la unidad hidrográfica.
- Densidad de drenaje ( $D_d$ ): Definida como la longitud de corrientes por unidad de área, expresada como (Aparicio Mijares, 2018):  $D_d = \frac{L_s}{A}$ , donde “ $L_s$ ” es la longitud total de las corrientes.

Por lo que, entre mayor sea la densidad del drenaje más rápida será la respuesta de salida del agua en una cuenca y valores altos, indican que es altamente disectada (Aparicio Mijares, 1989).

- Tiempo de concentración ( $t_c$ ): Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida (punto de aforo). Esta magnitud tiene la utilidad en la determinación de una planificación en usos de suelo, conservación de suelos y agua o gestión de recursos hídricos. Existen diferentes métodos para su estimación, generalmente se mide en minutos, y en el cual se incluyeron los siguientes, en base a las características de las unidades hidrográficas, no obstante, se tiene que tomar cuidadosamente este parámetro (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón y Gisbert Blanquer, 2010; Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2010):

$$\text{Método de Bransby-Williams: } t_c = 14.6 \cdot L_n \cdot A^{-0.1} \cdot j^{-0.2}$$

$$\text{Método de Témez: } t_c = 0.3 \cdot \left( \frac{L_n}{j^{0.25}} \right)^{0.76} \cdot 60$$

$$\text{Método de Kirpich: } t_c = 0.06628 \cdot \left( \frac{A^{0.77}}{j^{0.385}} \right) \cdot 60$$

$$\text{Método de Giandiotti: } t_c = \left( \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L_n}{25.3 \cdot \sqrt{j \cdot L_n}} \right) \cdot 60$$

$$\text{Método de California: } t_c = 60 \cdot \left( \frac{0.87075 \cdot L_n^3}{DE} \right)^{0.385}$$

$$\text{Método de Clark: } t_c = 0.355 \cdot \left( \frac{A}{j^{0.5}} \right)^{0.593} \cdot 60$$

Donde “j” es la pendiente media del cauce principal en unidades adimensionales.

A partir de estos métodos, se aplicaron Kirpich y California para las microcuencas dedicadas a suelos de cultivos y zonas agrícolas, eligiendo un promedio (véase resultados en la Tabla III-7) debido a los valores correlacionables que indicaron, debido a que las demás fórmulas no correlacionaban un valor racional.



Tabla III-7. Resultados de los parámetros de drenaje. Elaboración propia.

Unidades hidrográficas	Microcuenca Arroyo Toril-La Mora	Microcuenca El Arenal	Sector Gualulo	Sector La Fuente	Unidad Fray Francisco	Unidad San Jerónimo
Densidad de corrientes ( $D_s$ )	4.9866	4.0927	6.0786	5.7401	9.1846	14.3708
Densidad de drenaje ( $D_d$ )	3.0699	4.8918	3.3056	3.2483	4.1295	5.2390
Tiempo de concentración ( $t_c$ ) [min]	66.5918	102.7997	40.3185	44.6417	26.7356	25.4280

Tabla III-8. Magnitudes de los drenes en las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

Microcuenca Arroyo El Toril-La Mora			Sector La Fuente		
Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)	Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)
1	116.00	26.92	1	44.00	10.07
2	95.00	42.54	2	25.00	11.20
3	41.00	44.78	3	20.00	17.87
4	17.00	30.79	4	5.00	8.81
5	6.00	20.10	5	1.00	5.81
6	1.00	4.79	Sumatorias:	95.00	53.76
Sumatorias:	276.00	169.92	Unidad Fray Francisco		
Microcuenca El Arenal			Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)
Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)	1	31.00	6.85
1	144.00	27.69	2	22.00	10.61
2	104.00	52.64	3	4.00	4.32
3	42.00	63.21	4	2.00	4.23
4	11.00	34.08	5	1.00	0.97
5	1.00	9.95	Sumatorias:	60.00	26.98
Sumatorias:	302.00	187.56	Unidad San Jerónimo		
Sector Gualulo			Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)
Orden de drenaje	No. de Cauces	Long (km)	1	40.00	8.08
1	41.00	9.95	2	13.00	4.93
2	26.00	13.82	3	8.00	6.56
3	11.00	12.76	4	1.00	3.03
4	2.00	4.67	Sumatorias:	62.00	22.60
5	1.00	2.85			
Sumatorias:	81.00	44.05			

### III.3. Precipitación

Para conocer cómo surge este fenómeno natural se tiene que entender el agua como un sistema y sus propiedades, así como en el “ciclo del agua” (véase en el Capítulo I – Conceptos esenciales). En la ingeniería, la precipitación forma el punto de partida o base de los diversos estudios incumbentes con el uso y el control del agua.

Pero ¿Cómo se mide?

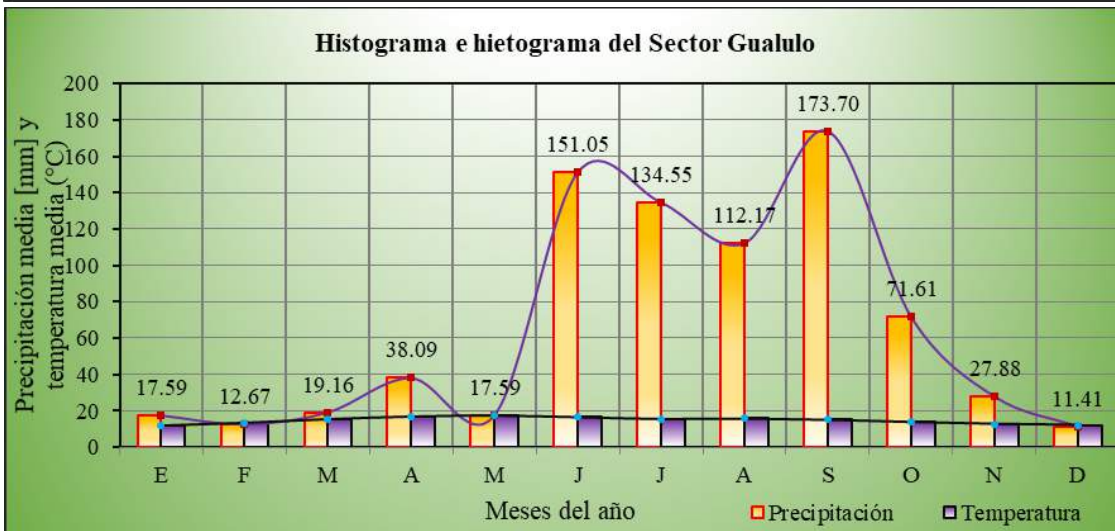
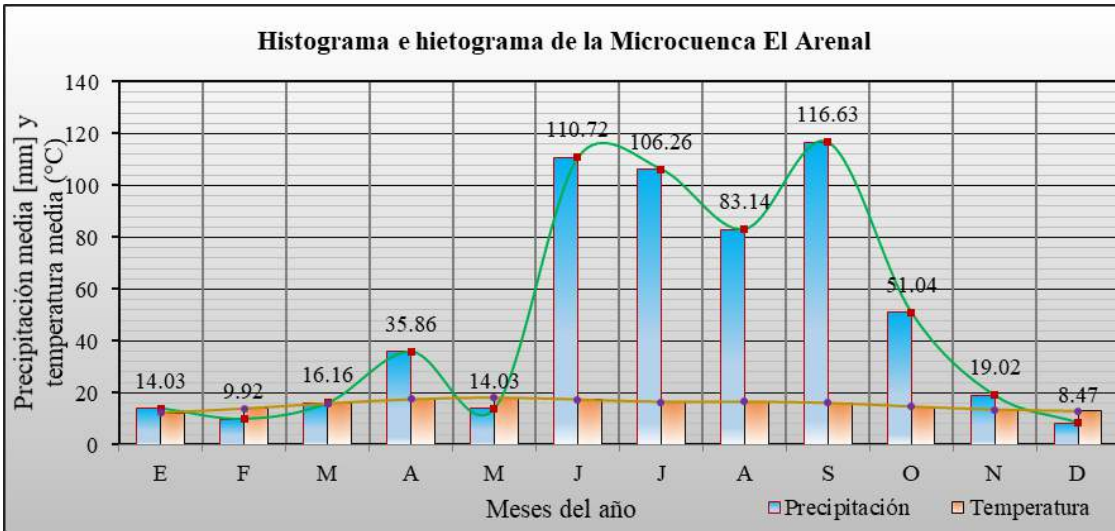
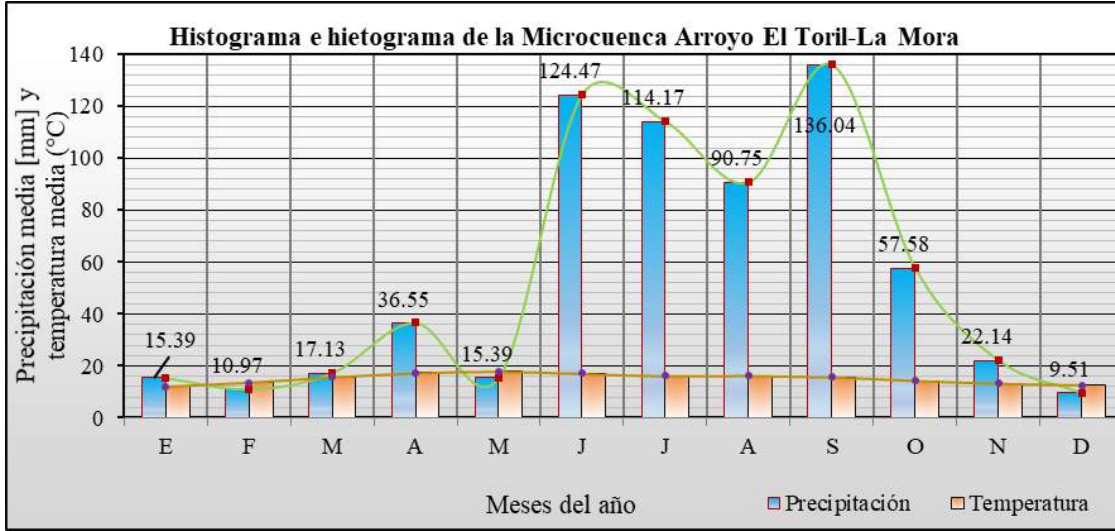
Existen diferentes aparatos para medir la precipitación, el más usual en México son los pluviógrafos, formados por un recipiente cilíndrico al que descarga un embudo que capta el agua [se colocan mallas para evitar basura o algún objeto que se pueda introducir], y registra de forma continua gráficamente la cantidad de agua (milímetros) caída por un período determinado.

Existen varios tipos de pluviómetros, sin embargo, la finalidad es la misma (Aparicio Mijares, 2018).

De acuerdo con la página del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL, 2019) se pueden obtener los parámetros de precipitación, además de la temperatura (véase Tabla III-9), y también su media mensual de cierta área, región o incluso una unidad hidrográfica (véase Fig. III-4) eligiendo un punto de aforo para generar la delimitación de una cuenca, con el fin de obtener información correspondiente en el área de estudio.

Tabla III-9. *Resultados de la precipitación y temperatura media anual en las unidades hidrográficas del área de estudio. Elaboración propia.*

Unidades hidrográficas	Precipitación media anual [mm]	Temperatura media anual [°C]
M. Arroyo El Toril-La Mora	650.09	15.13
M. El Arenal	585.29	15.47
S. Gualulo	787.47	14.73
S. La Fuente	765.12	14.72
U. Fray Francisco	805.97	13.84
U. San Jerónimo	816.96	13.13



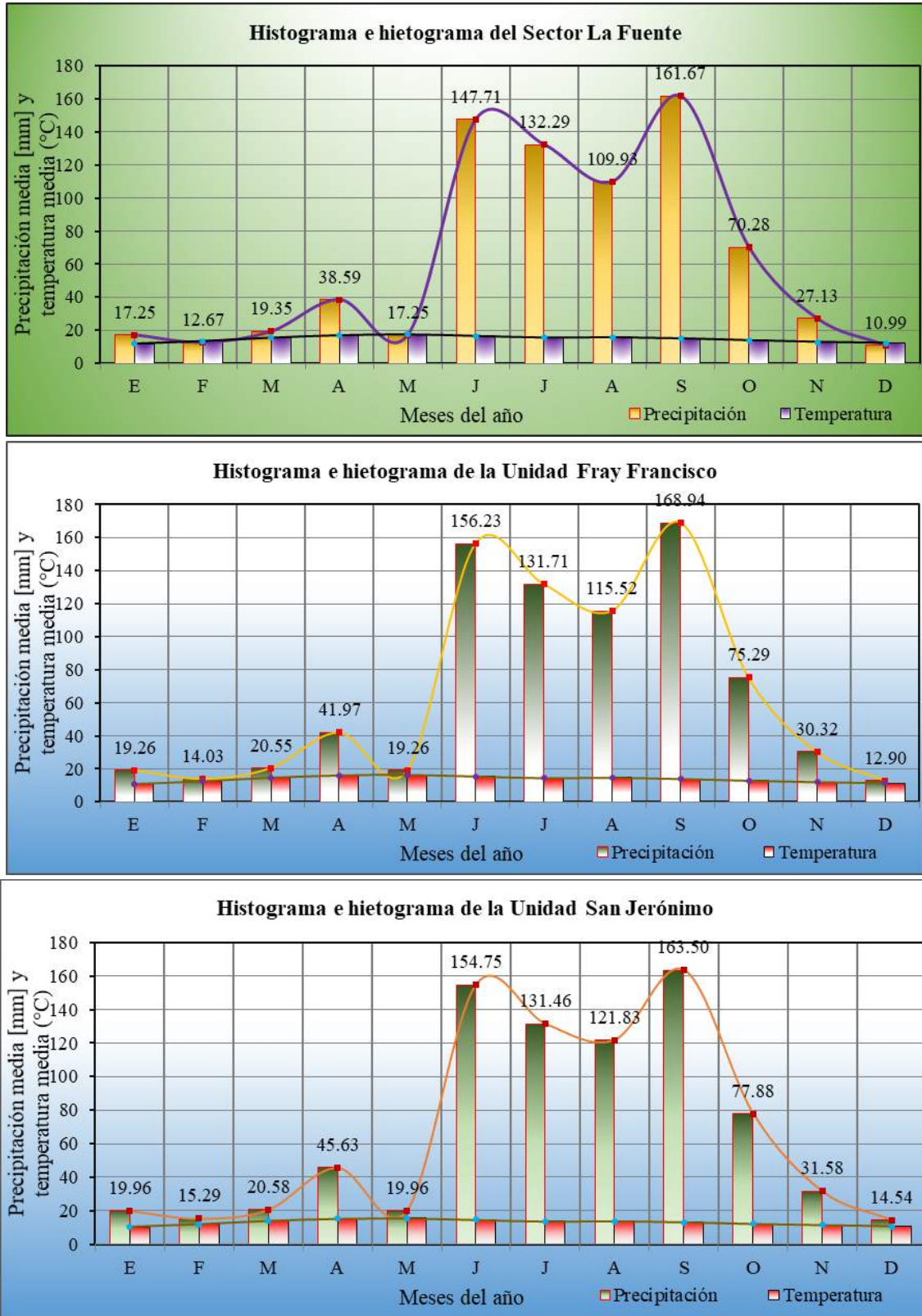


Figura III-4. Histogramas e hietogramas de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

### III.4. Evapotranspiración

Este proceso natural se da a causa de la relación con la evaporación y la transpiración.

La evaporación es un proceso, en el que interviene un líquido para transformarse al estado gaseoso, una característica es que la presión de vapor de un líquido es directamente proporcional a la temperatura, este comienza hasta que el aire se sature con humedad, toma lugar desde superficies de agua libre—lagos, charcos, reservas, entre otros. La transpiración es un mecanismo de vida en la flora, mide la cantidad de agua que necesitan para su sustento y el vapor de agua que emiten (Fetter, 2001).

Es de importancia saber la cantidad de agua que se pierde mediante el proceso de evapotranspiración, para conocer cuánta agua superficial existe en cierta zona. Bajo condiciones de campo no es posible separar la evaporación de la transpiración total, el término potencial de evapotranspiración fue introducido por Thornthwaite (1944) como igual a “la pérdida de agua, cual ocurrirá si en tiempo no hay deficiencia de agua en el suelo por uso de la vegetación”. También llamado uso consuntivo, está basado en la suposición de que el potencial depende sólo sobre las condiciones meteorológicas ignorando el efecto de la densidad de vegetación y madurez, aun así, es útil, especialmente en áreas húmedas (Fetter, 2001; Aparicio Mijares, 2018). De acuerdo con Thornthwaite (1944; citado en Aparicio Mijares), se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$U_j = 1.6 \cdot K_a \left( \frac{10 \cdot T_j}{I} \right)^a$$
, donde “ $U_j$ ” es el uso consuntivo en el mes  $j$ , en cm; “ $T_j$ ” es la temperatura media en el mes  $j$ , en °C; “ $a$ ,  $I$ ” son constantes; y “ $K_a$ ” constante que depende de la latitud y el mes del año (véase en Anexo, Tabla A-0)

Las constantes “ $I$ ” (índice de eficiencia de temperatura) y “ $a$ ” se calculan de la siguiente manera:



$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

donde  $i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514}$ , “j” es el número del mes y  $a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot$

$$I^2 + 179 \cdot 10^{-4} \cdot I + 0.492$$

Tabla III-10. Resultados de la evapotranspiración (mm) de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

	Mes	$T_j$	$i_j$	$a$	$Ka (Lat. 20^\circ)$	$U_j [mm]$		Mes	$T_j$	$i_j$	$a$	$Ka (Lat. 20^\circ)$	$U_j [mm]$
M. Arroyo El Toril-La Mora	E	11.93	3.73	1.51	0.95	38.36	S. La Fuente	E	11.63	3.59	1.46	0.95	38.30
	F	13.60	4.55	1.51	0.90	44.27		F	13.30	4.40	1.46	0.90	44.14
	M	15.69	5.65	1.51	1.03	62.87		M	15.43	5.51	1.46	1.03	62.81
	A	17.30	6.55	1.51	1.05	74.24		A	16.98	6.37	1.46	1.05	73.67
	M	17.95	6.93	1.51	1.13	84.51		M	17.53	6.68	1.46	1.13	83.06
	J	17.09	6.43	1.51	1.11	77.08		J	16.56	6.13	1.46	1.11	75.07
	J	16.11	5.88	1.51	1.14	72.43		J	15.52	5.56	1.46	1.14	70.11
	A	16.27	5.97	1.51	1.11	71.57		A	15.73	5.67	1.46	1.11	69.60
	S	15.69	5.65	1.51	1.02	62.25		S	15.07	5.31	1.46	1.02	60.06
	O	14.28	4.90	1.51	1.00	52.98		O	13.83	4.67	1.46	1.00	51.94
	N	13.14	4.32	1.51	0.93	43.43		N	12.82	4.16	1.46	0.93	43.22
	D	12.56	4.03	1.51	0.91	39.69		D	12.21	3.86	1.46	0.91	39.36
$\Sigma=$		$I=$	64.57			723.68	$\Sigma=$		$I=$	61.91			711.34
M. El Arenal	E	12.25	3.88	1.54	0.95	38.84	U. Fray Francisco	E	10.94	3.27	1.38	0.95	37.85
	F	13.87	4.69	1.54	0.90	44.58		F	12.58	4.04	1.38	0.90	43.51
	M	15.94	5.79	1.54	1.03	63.21		M	14.77	5.15	1.38	1.03	62.07
	A	17.51	6.67	1.54	1.05	74.48		A	16.16	5.91	1.38	1.05	71.64
	M	18.20	7.07	1.54	1.13	85.11		M	16.49	6.09	1.38	1.13	79.29
	J	17.45	6.63	1.54	1.11	78.31		J	15.49	5.54	1.38	1.11	71.46
	J	16.52	6.10	1.54	1.14	73.90		J	14.46	4.99	1.38	1.14	66.74
	A	16.63	6.17	1.54	1.11	72.71		A	14.68	5.11	1.38	1.11	66.36
	S	16.12	5.88	1.54	1.02	63.69		S	13.98	4.74	1.38	1.02	56.98
	O	14.70	5.12	1.54	1.00	54.15		O	12.92	4.21	1.38	1.00	50.14
	N	13.50	4.50	1.54	0.93	44.19		N	12.07	3.80	1.38	0.93	42.44
	D	12.92	4.21	1.54	0.91	40.36		D	11.47	3.52	1.38	0.91	38.74
$\Sigma=$		$I=$	66.71			733.53	$\Sigma=$		$I=$	56.38			687.20
S. Gualtulo	E	11.60	3.57	1.47	0.95	38.09	U. San Jerónimo	E	10.36	3.01	1.31	0.95	37.43
	F	13.27	4.38	1.47	0.90	43.97		F	12.02	3.77	1.31	0.90	43.08
	M	15.47	5.53	1.47	1.03	62.97		M	14.15	4.83	1.31	1.03	61.09
	A	17.03	6.39	1.47	1.05	73.90		A	15.43	5.51	1.31	1.05	69.73
	M	17.59	6.72	1.47	1.13	83.45		M	15.67	5.64	1.31	1.13	76.56
	J	16.63	6.17	1.47	1.11	75.45		J	14.70	5.12	1.31	1.11	69.21
	J	15.55	5.57	1.47	1.14	70.27		J	13.69	4.60	1.31	1.14	64.74
	A	15.78	5.70	1.47	1.11	69.87		A	13.91	4.71	1.31	1.11	64.34
	S	15.08	5.32	1.47	1.02	60.08		S	13.24	4.37	1.31	1.02	55.42
	O	13.80	4.65	1.47	1.00	51.72		O	12.17	3.84	1.31	1.00	48.65
	N	12.78	4.14	1.47	0.93	42.97		N	11.44	3.50	1.31	0.93	41.72
	D	12.15	3.84	1.47	0.91	39.08		D	10.75	3.18	1.31	0.91	37.62
$\Sigma=$		$I=$	61.97			711.82	$\Sigma=$		$I=$	52.08			669.58



### III.5. Esgurrimento o escorrentía

El escurrimento o escorrentía es el desplazamiento natural del agua en el relieve terrestre en la forma que toma sobre una superficie, proveniente de la precipitación, en donde encuentra lugar en un dren, formando corrientes, y finalmente ser drenada hasta la salida de una cuenca.

De acuerdo con Aparicio Mijares (2018), (véase Fig. III-5), la escorrentía se divide en tres partes: 1) La escorrentía superficial, que refiere a todo el desplazamiento del agua que no haya sido infiltrado en el suelo y aún no llegue a un cause bien definido; 2) La escorrentía subsuperficial, trata del agua que se llega a infiltrar cerca de la superficie del suelo y se desplaza en forma de desfase abajo en su superficie; 3) Eschorrentía subterránea, es el agua que se infiltra debajo de los niveles freáticos [sin embargo, en el presente trabajo se le considera como infiltración].

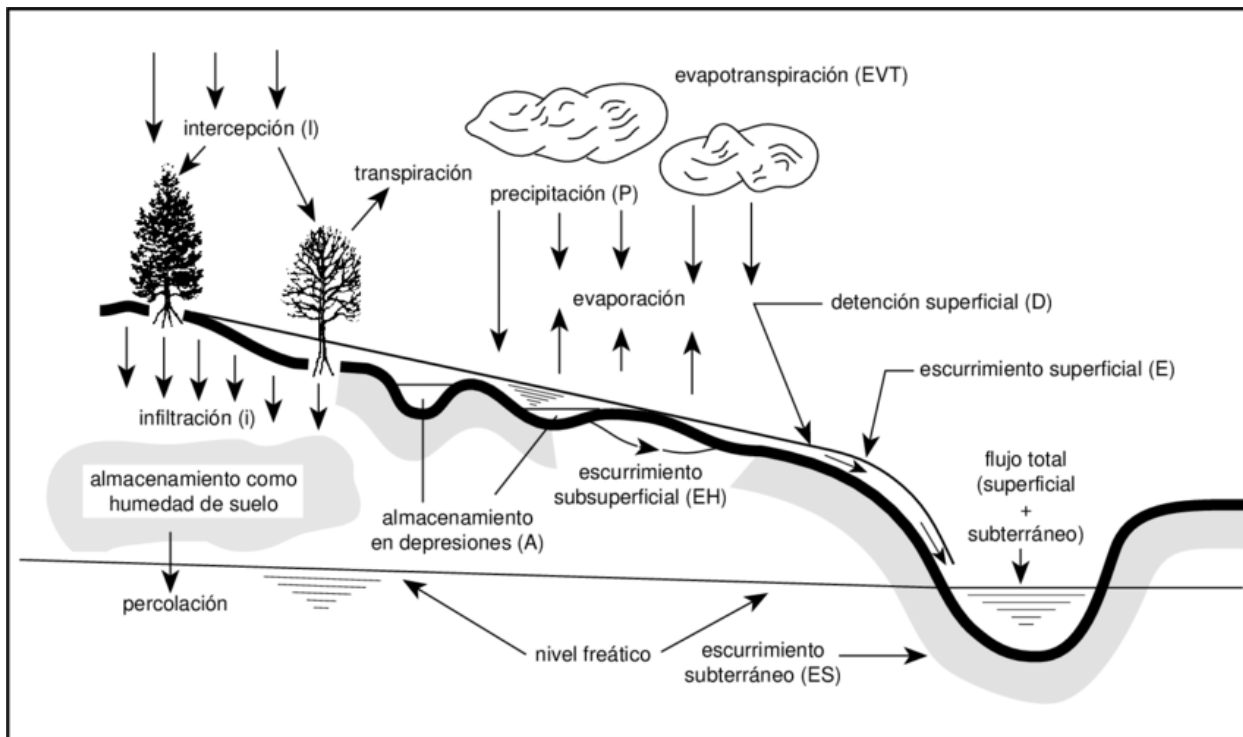


Figura III-5. Ciclo del escurrimento en base a una cuenca (Vich, 1996, pág. 7).

### III.5.1. Coeficiente de escorrentía.

De acuerdo con Sánchez San Román (2012) menciona que en el cálculo del coeficiente de escorrentía se obtiene de tablas (véase Tabla A-0-1, en anexos) en base a la vegetación, uso del suelo, edafología y la relación con su pendiente de una cuenca. Por medio de el método racional que consiste en:

Evaluar el caudal que producirá una precipitación. En el caso que la intensidad de la precipitación fuera constante, la escorrentía del caudal generado se define por la siguiente ecuación:  $Q \left( \frac{m^3}{hora} \right) = I \left( \frac{mm}{hora} \right) \cdot 10^{-3} \cdot A(km^2) \cdot 10^{-6}$ , con  $10^{-3}$  convertimos mm/hora en metros/hora y con  $10^{-6}$  pasamos  $km^2$  a  $m^2$ . Así el producto es  $m^3/hora$ , y para que el caudal sea

en  $m^3/s$ , se tiene que dividir por 3,600 s que tiene una h y la expresión se torna:  $\left( \frac{m^3}{hora} \right) =$

$$I \left( \frac{mm}{hora} \right) \cdot A(km^2) / 3.6.$$

En el cálculo anterior se tiene que la intensidad de precipitación era neta [constante], pero si, “I” es una precipitación real, se generará sólo una parte de la escorrentía, por lo que, se aplica un coeficiente (C), y se tendrá la expresión siguiente:  $Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6}$ , donde “Q” es el caudal, “C” es el coeficiente de escorrentía, “I” intensidad de precipitación en mm/hora y “A” el área de la cuenca en  $km^2$ .

En el caso de que la unidad hidrográfica cuente con subdivisiones del suelo, se define la siguiente ecuación para el cálculo del coeficiente de escorrentía:

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_i \cdot A_i}{A_T}$$

Donde, “i” son los números parciales de los coeficientes y áreas en que se dividió la cuenca y “ $A_T$ ” el área total de la cuenca.

Ej. de la microcuenca Arroyo El Toril-La Mora:

$$C = \frac{(15 \% \cdot 22.3932679268 \text{ km}^2) + (7.5 \% \cdot 32.9554375452 \text{ km}^2)}{55.348705 \text{ km}^2} \therefore C$$

$$= 10.53439 \% \text{ o } 0.10534 \text{ adimensional}$$

A continuación, se muestran los resultados (véase Tabla III-11) para el coeficiente de escorrentía ( $C$ ) (véase Fig. III-6), la precipitación media ( $P_m$ ) y el caudal ( $Q$ ) en milímetros por los meses de cada unidad hidrográfica.

Tabla III-11. Resultados del coeficiente de escorrentía y caudal de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

Microcuenca Arroyo El Toril-La Mora				Microcuenca El Arenal			
Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]	Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]
E	15.39	0.11	1.62	E	14.03	0.08	1.07
F	10.97	0.11	1.16	F	9.92	0.08	0.75
M	17.13	0.11	1.80	M	16.16	0.08	1.23
A	36.55	0.11	3.85	A	35.86	0.08	2.72
M	15.39	0.11	1.62	M	14.03	0.08	1.07
J	124.47	0.11	13.11	J	110.72	0.08	8.41
J	114.17	0.11	12.03	J	106.26	0.08	8.07
A	90.75	0.11	9.56	A	83.14	0.08	6.31
S	136.04	0.11	14.33	S	116.63	0.08	8.86
O	57.58	0.11	6.07	O	51.04	0.08	3.88
N	22.14	0.11	2.33	N	19.02	0.08	1.44
D	9.51	0.11	1.00	D	8.47	0.08	0.64
$\Sigma =$	650.09		68.48	$\Sigma =$	585.29		44.44
Sector Gualulo				Sector La Fuente			
Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]	Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]
E	17.59	0.12	2.05	E	17.25	0.15	2.59
F	12.67	0.12	1.48	F	12.67	0.15	1.90
M	19.16	0.12	2.23	M	19.35	0.15	2.90
A	38.09	0.12	4.44	A	38.59	0.15	5.78
M	17.59	0.12	2.05	M	17.25	0.15	2.59
J	151.05	0.12	17.62	J	147.71	0.15	22.14
J	134.55	0.12	15.69	J	132.29	0.15	19.83
A	112.17	0.12	13.08	A	109.93	0.15	16.47
S	173.70	0.12	20.26	S	161.67	0.15	24.23
O	71.61	0.12	8.35	O	70.28	0.15	10.53
N	27.88	0.12	3.25	N	27.13	0.15	4.07
D	11.41	0.12	1.33	D	10.99	0.15	1.65
$\Sigma =$	787.47		91.85	$\Sigma =$	765.12		114.66

Unidad Fray Francisco				Unidad San Jerónimo			
Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]	Meses	$P_m$ [mm]	$C$ [ADIM]	$Q$ [mm]
E	19.26	0.11	2.03	E	19.96	0.11	2.28
F	14.03	0.11	1.48	F	15.29	0.11	1.75
M	20.55	0.11	2.16	M	20.58	0.11	2.35
A	41.97	0.11	4.42	A	45.63	0.11	5.21
M	19.26	0.11	2.03	M	19.96	0.11	2.28
J	156.23	0.11	16.46	J	154.75	0.11	17.67
J	131.71	0.11	13.88	J	131.46	0.11	15.01
A	115.52	0.11	12.17	A	121.83	0.11	13.91
S	168.94	0.11	17.80	S	163.50	0.11	18.67
O	75.29	0.11	7.93	O	77.88	0.11	8.89
N	30.32	0.11	3.19	N	31.58	0.11	3.61
D	12.90	0.11	1.36	D	14.54	0.11	1.66
$\Sigma =$	805.97		84.91	$\Sigma =$	816.96		93.28



Figura III-6. Representación del coeficiente de escorrentía en las unidades hidrográficas del área de estudio. Elaboración propia tomando la información de INEGI (1984).

### III.6. Infiltración

La infiltración se define como el movimiento de agua a través de la superficie del suelo y dentro de ella, originado por la gravedad, la permeabilidad, procesos químicos, físicos y biológicos que conlleven a la capacidad de transmitir el agua y los planos de ruptura con o sin movimiento (fallas o fracturas) (Aparicio Mijares, 2018).

Según Aparicio Mijares (2018), menciona que la diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de pérdidas, estas en general están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración.

Para el cálculo de este factor, se usará un método empírico, en el cual según Ordoñez Gálvez (2011), refiere la siguiente ecuación:

$$P_m = U_m + Q_m + I_m$$

Donde “ $P_m$ ” es la precipitación media, “ $U_m$ ” la evapotranspiración media o uso consuntivo medio, “ $Q_m$ ” es el caudal o escorrentía medios e “ $I_m$ ” que es la infiltración media.

Por lo tanto, la ecuación para obtener “ $I_m$ ” queda:

$$(P_m = U_m + Q_m + I_m) * (-) = (-P_m = -U_m - Q_m - I_m) \therefore I_m = P_m - U_m - Q_m$$

A continuación, en la Tabla III-12 se muestran los resultados relacionados con la ecuación anterior en  $m^3$  para cada unidad hidrográfica en base al producto del área respectiva de la cuenca, así como los hidrogramas (véase Fig. III-7).

Tabla III-12. Resultados de infiltración de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.

Microcuenca Arroyo El Toril-La Mora				
Meses	$P_m$ [ $m^3$ ]	$U_m$ [ $m^3$ ]	$Q_m$ [ $m^3$ ]	$I_m$ [ $m^3$ ]
E	851673.6163	2122982.8120	8971.8613	Déficit de agua
F	607369.5641	2450346.0681	6398.2673	
M	948258.9393	3479999.9195	9989.3286	
A	2023160.1142	4109299.8331	21312.7558	
M	851691.5772	4677352.6488	8972.0505	
J	6889081.0339	4266091.1096	72572.2601	2550417.6642
J	6319282.5608	4009134.1967	66569.7813	2243578.5828
A	5022803.3418	3961467.6843	52912.1648	1008423.4928
S	7529806.4401	3445555.3658	79321.9109	4004929.1635
O	3187132.3839	2932515.9496	33574.4926	221041.9417
N	1225185.7382	2403523.5759	12906.5833	Déficit de agua

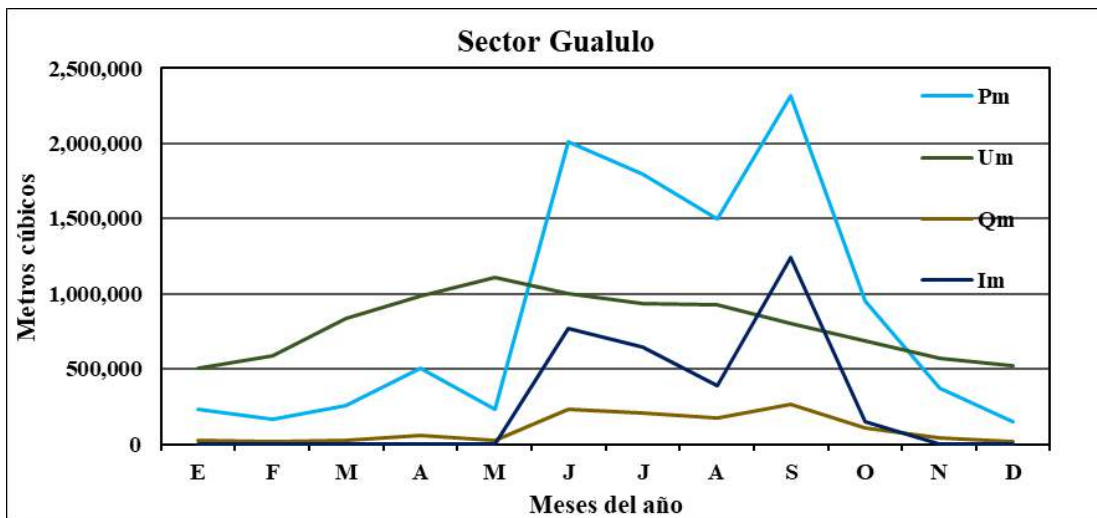
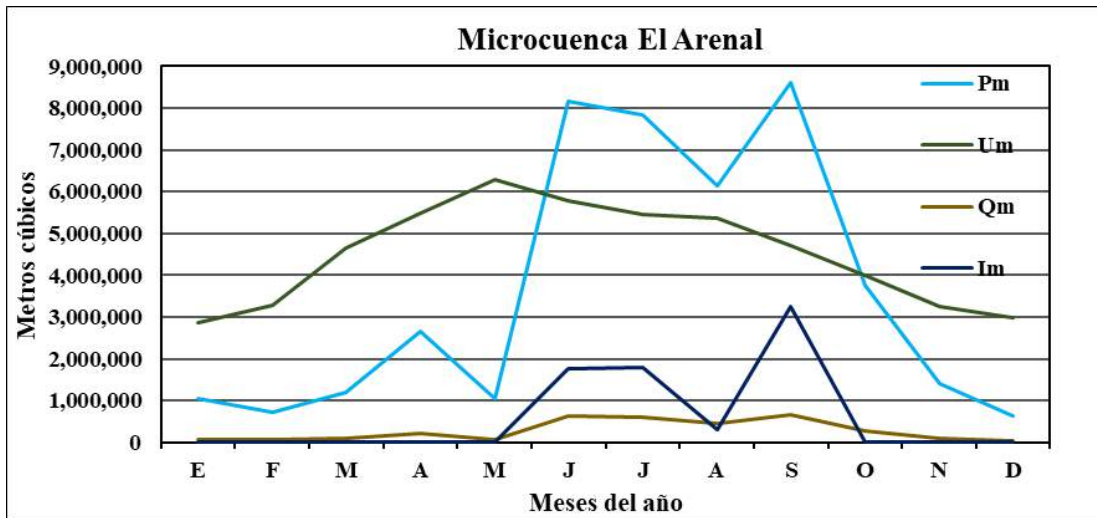
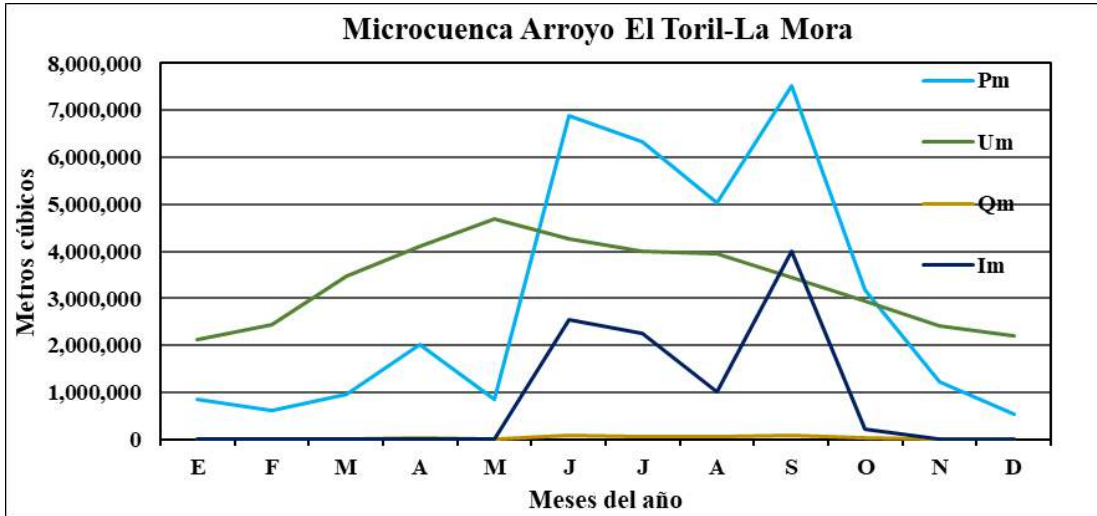
D	526362.5191	2196705.6153	5544.9076	
Media anual $\Sigma =$	35981807.8290	40054974.7785	379046.3641	10028390.8450
<b>Microcuenca El Arenal</b>				
Meses	$P_m$ [m <sup>3</sup> ]	$U_m$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_m$ [m <sup>3</sup> ]	$I_m$ [m <sup>3</sup> ]
E	1035518.2914	2866176.5833	78624.1045	Déficit de agua
F	732159.8054	3289390.7876	55590.9147	
M	1192321.8332	4664476.0473	90529.7735	
A	2646392.8464	5496018.1244	200933.4546	
M	1035518.2914	6279992.3785	78624.1045	
J	8169976.9550	5778238.1114	620324.2637	1771414.5800
J	7840587.0314	5453421.1731	595314.5772	1791851.2810
A	6135220.4074	5365282.9061	465830.6997	304106.8016
S	8606362.2366	4699817.8519	653457.8184	3253086.5664
O	3765949.6374	3995474.8148	285938.3752	Déficit de agua
N	1403647.9136	3260449.8843	106575.1915	
D	625164.4475	2978460.4506	47467.0464	
Media anual $\Sigma =$	43188819.6967	54127199.1134	3279210.3239	7120459.2290
<b>Sector Gualulo</b>				
Meses	$P_m$ [m <sup>3</sup> ]	$U_m$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_m$ [m <sup>3</sup> ]	$I_m$ [m <sup>3</sup> ]
E	234446.0962	507626.4863	27345.3969	Déficit de agua
F	168859.5218	585952.3579	19695.4896	
M	255267.2415	839150.1732	29773.9401	
A	507619.5227	984794.5815	59207.8842	
M	234446.0962	1111981.4042	27345.3969	
J	2012780.1174	1005411.7497	234767.2752	772601.0924
J	1792908.8229	936342.8391	209121.8586	647444.1252
A	1494750.0220	931102.2627	174345.1194	389302.6400
S	2314686.7244	800539.9340	269981.1522	1244165.6381
O	954233.0897	689154.7402	111300.1368	153778.2126
N	371449.2324	572548.0453	43325.2114	Déficit de agua
D	151994.3608	520716.7392	17728.3657	
Media anual $\Sigma =$	10493440.8479	9485321.3133	1223937.2271	3207291.7083
<b>Sector La Fuente</b>				
Meses	$P_m$ [m <sup>3</sup> ]	$U_m$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_m$ [m <sup>3</sup> ]	$I_m$ [m <sup>3</sup> ]
E	285540.5067	633832.3660	42792.0083	Déficit de agua
F	209768.5845	730445.2770	31436.5871	
M	320236.0711	1039547.4412	47991.5959	
A	638677.5440	1219279.7976	95714.2476	
M	285540.5067	1374681.8089	42792.0083	
J	2444641.4889	1242477.3077	366361.7469	835802.4343
J	2189409.7511	1160316.5919	328111.9071	700981.2521
A	1819323.7312	1151815.4605	272649.6394	394858.6314
S	2675670.0796	993980.9993	400984.4261	1280704.6542
O	1163099.0053	859541.0760	174305.7153	129252.2140



N	449048.3387	715362.6517	67295.8119	Déficit de agua
D	181852.6132	651483.3249	27253.0109	
Media anual $\Sigma =$	12662808.2210	11772764.1025	1897688.7047	3341599.1860
<b>Unidad Fray Francisco</b>				
Meses	$P_m$ [m <sup>3</sup> ]	$U_m$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_m$ [m <sup>3</sup> ]	$I_m$ [m <sup>3</sup> ]
E	125807.1773	247266.1236	13253.8261	Déficit de agua
F	91668.5463	284217.2121	9657.3105	
M	134236.4689	405461.1816	14141.8546	
A	274162.7097	467981.8474	28883.1285	
M	125807.1773	517950.8349	13253.8261	
J	1020576.4820	466797.1558	107518.0565	446261.2698
J	860419.9414	435989.6151	90645.5141	333784.8122
A	754632.3316	433539.7004	79500.7558	241591.8755
S	1103605.0044	372236.2949	116265.1377	615103.5718
O	491849.1656	327560.8970	51816.4658	112471.8028
N	198088.3529	277232.9485	20868.6709	Déficit de agua
D	84292.9161	253070.0773	8880.2855	
Media anual $\Sigma =$	5265146.2737	4489303.8885	554684.8320	1749213.3320
<b>Unidad San Jerónimo</b>				
Meses	$P_m$ [m <sup>3</sup> ]	$U_m$ [m <sup>3</sup> ]	$Q_m$ [m <sup>3</sup> ]	$I_m$ [m <sup>3</sup> ]
E	86106.1377	161474.3961	9831.3597	Déficit de agua
F	65972.7610	185838.7031	7532.5867	
M	88802.5721	263573.2029	10139.2311	
A	196839.7094	300842.2295	22474.6115	
M	86106.1377	330309.5605	9831.3597	
J	667637.1513	298594.8171	76228.9563	292813.3779
J	567150.0302	279294.4680	64755.6158	223099.9464
A	525624.9408	277597.6902	60014.3964	188012.8542
S	705387.2325	239089.0894	80539.1558	385758.9873
O	335975.7231	209871.5662	38360.7753	87743.3816
N	136259.8171	179996.7162	15557.7676	Déficit de agua
D	62737.0398	162301.5789	7163.1410	
Media anual $\Sigma =$	3524599.2527	2888784.0183	402428.9571	1177428.5473

### III.7. Balance hidrológico

En las siguientes gráficas (véase Fig. III-7) de los balances hidrológicos se puede observar cómo se distribuye el agua a través del tiempo, teniendo en cuenta que los meses con mayor infiltración y precipitación son desde mayo a octubre y de enero a mayo el mayor evento de evapotranspiración.



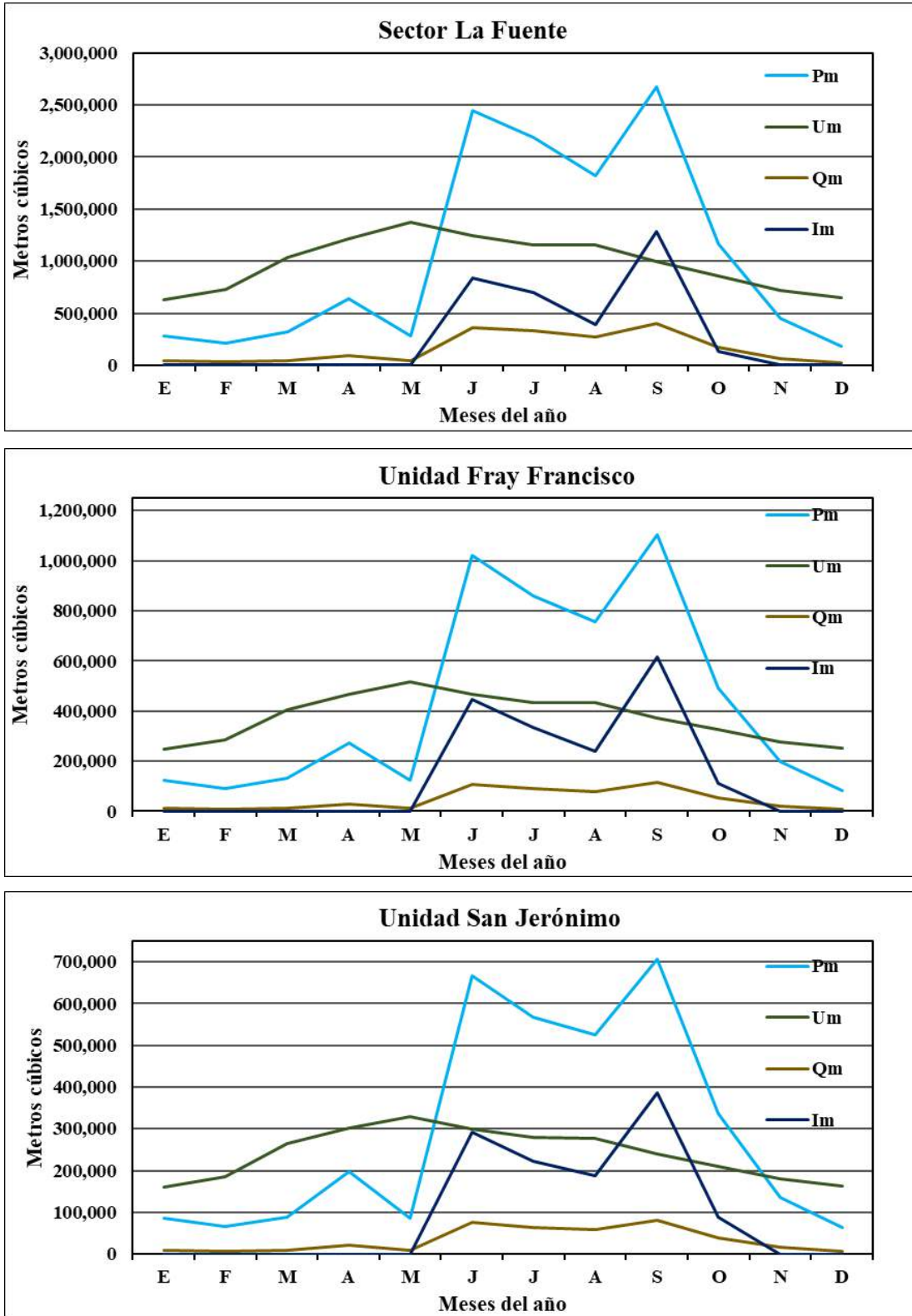


Figura III-7. Gráficas de los balances hidrológicos de las unidades hidrográficas. Elaboración propia.



## Capítulo IV. Geofísica

Aquí refiere a la aplicación de la geofísica, describiendo la teoría general para los registros electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM), se denotan explicaciones extractas definiendo las interpretaciones en el área de estudio y zonas aledañas en base al léxico estratigráfico, la geomorfología e hidrología. Se toma de vital importancia la localización del agua subterránea, así como propuestas para algún pozo de agua o noria, y se considera en gran pertinencia en la hidrogeología, la distribución del acuífero principalmente, esto en las cercanías de la ciudad de Actopan. También se presenta una parte de la caracterización a nivel subsuelo y una representación de cómo se distribuye la cuenca.

La geofísica es la ciencia que se encarga del estudio físico de la Tierra. Su objeto es el tratado de los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas e historia evolutiva de nuestro planeta, para ello, se usan métodos cuantitativos y cualitativos como es la investigación en la propagación de ondas, gravedad, electricidad y magnetismo (SGM, 2017). A continuación, se presenta un método para la obtención de la morfología en el subsuelo dentro del área de estudio y el desarrollo del parámetro relacionado con la electricidad.

#### IV.1. Resistividad.

Tabla IV-1. Resistividad de varios tipos de rocas y sedimentos (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990, pág. 290).

Tipo de roca	Rango de resistividad ( $\Omega\text{m}$ )
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Aluviones y arenas	10 – 800
Areniscas	$1 - 6.4 \times 10^8$
Margas	3 – 70
Argilitas	$10 - 8 \times 10^2$
Arcillas	1 – 100
Arcilla consolidada	$20 - 2 \times 10^3$
Arcilla húmeda no consolidada	20
Calizas	$50 - 10^7$
Dolomitas	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Tufas	$2 \times 10^3$ (húmedas) – $10^5$ (secas)
Tobas volcánicas	20 – 100
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$ (seco), con el 0.95 % de $\text{H}_2\text{O}$ es de $4 \times 10^4$
Andesita	$4.5 \times 10^4$ (húmeda) – $1.7 \times 10^2$
Diorita porfídica	$1.9 \times 10^3$ (húmeda) – $2.8 \times 10^4$
Granito porfídico	$4.5 \times 10^3$ (húmedo) – $1.3 \times 10^6$
Dacita	$2 \times 10^4$ (húmeda)
Cuarcitas (varias)	$10 - 2 \times 10^8$

no es conductor será alta.

La resistividad en las rocas se mide en extensos márgenes, ya que se conoce que no son buenas conductoras de electricidad y, por lo tanto, es casi imposible asignar valores específicos para su determinación, como consecuente es de suma importancia tener datos geológicos e

La resistividad o resistencia, registra la oposición al paso del flujo eléctrico a través de una formación rocosa o material, y se mide en Ohm-metros, ésta a su vez es recíproca a la conductividad y está relacionada con la porosidad, la cantidad y el tipo de líquido presente en la roca, y el orificio de perforación (Evenick, 2008). Como se observa en la Tabla IV-1 se menciona que mientras el material sea conductor de electricidad la resistividad será baja, por el otro lado, si

información de apoyo en la zona a estudiar para tener una mejor interpretación de la estructura en el subsuelo.

El agua químicamente pura es un aislante de la electricidad, sin embargo, en la naturaleza la podemos encontrar con sales disueltas en forma iónica y, por tanto, su conductividad es proporcional a su grado de salinidad (véase Tabla IV-2) (FCIHS, 2013).

A continuación, en la interpretación de los TEM se toma un parámetro subdividido en el procesamiento geofísico dado (Resistividad procesada [se tomará ésta] e isorresistividad aparente)

Tabla IV-2. Resistividad del agua (FCIHS, 2013, pág. 13)

Tipo	Resistividad ( $\Omega\text{-m}$ )
Agua de lagos y arroyos de alta montaña	$10^3 - 3 \cdot 10^3$
Agua dulce superficial	$10 - 10^3$
Agua salobre superficial	2 - 10
Agua subterránea	1 - 20
Agua de lago salado	0.1 - 1
Agua marina	$\sim 0.2$
Agua de impregnación de rocas	0.03 - 10

## IV.2. Método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo

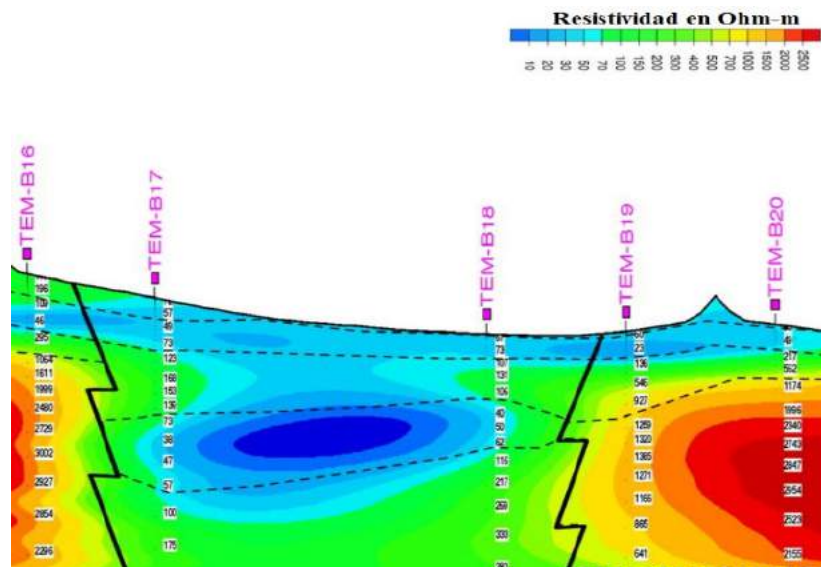


Figura IV-1. Ejemplo de un TEM (Geotem, 2019).



El método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), consiste en energizar el subsuelo con una bobina moderada que induce corriente continua, después de un intervalo de tiempo, el pulso de corriente es interrumpido de forma abrupta, este cambio rápido en el campo primario producirá corrientes eléctricas en formaciones conductoras en el subsuelo, que se disiparán mientras que la región interior del cuerpo conductor reflejará un decremento en su campo magnético y las corrientes inducidas comenzarán a fluir en el medio. Un receptor en superficie mide las variaciones del campo magnético secundario la cual es registrada como un decaimiento de voltaje con el tiempo, esto contiene la información sobre la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo, ya que depende de la magnitud y distribución de la corriente inducida. (Geotem, 2019, párr. 1 y 2).

### IV.3. Localización de los TEM

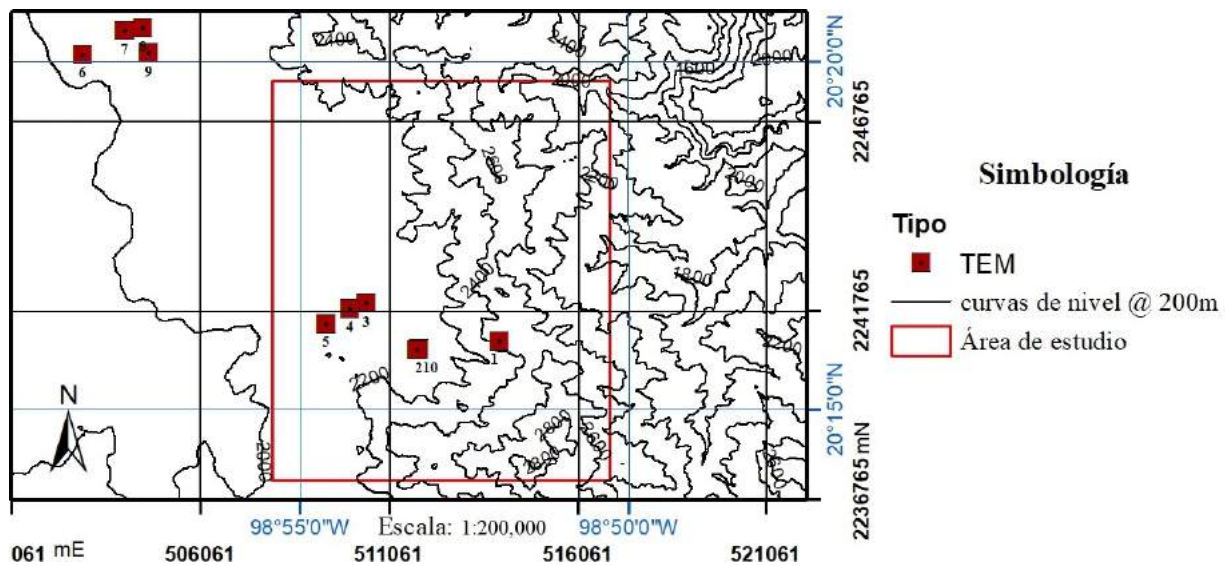


Figura IV-2. Localización de los TEM. Tomado de (EPYESA, 2017)

Como se puede observar en la Figura IV-2, se encuentran ubicados los TEM del área de estudio, siendo: 1) Fray Francisco; 2 y 10) La Mesa I y II; 3) El Meje III; 4) El Meje II; 5) El



Meje I; 6) Ejido Sta. Teresa I; 7) Ejido Sta. Teresa II; 8) Ejido Sta. Teresa III; 9) y Ejido Sta. Teresa IV.

Para la interpretación de los perfiles geoelectricos es necesario mencionar que: no es posible establecer una correspondencia unívoca entre material y conductividad, es decir, un material rocoso en su resistividad (oposición al paso eléctrico) tendrá diferencias en su magnitud, dependiendo si está saturado con agua o no entre sus poros [si están interconectados o no], además de diversos factores; también, en los laboratorios se han realizado estudios que relacionan linealmente el contenido de agua con el valor de resistividad de la formación, por resultante, el grado de saturación en la muestra condiciona directamente el valor de resistividad; los contrastes grandes en disminución podrían indicar la saturación de un fluido (agua). (Cimadevilla Fuente, 2017)

La interpretación se constituirá de la estructura subterránea primordialmente, basándose en la resistividad ya procesada y la relación con los rangos de la isoresistividad aparente, una modificación en la Tabla IV-1, ya que los valores expuestos son de tipo depósito, en el cual aquí se le infiere como una roca muy pobremente cementada y de material volcánico tobáceo y epiclástico en el área de estudio, también se apoya en el léxico estratigráfico para conocer la formación rocosa. Se demuestran los datos de la roca de acuerdo con la bibliografía, y el medio ambiente sedimentario de depósito, ya que influye en el sentido para conocer si era de alta o baja energía, también se apoya en relación con los resultados del balance hidrológico del capítulo III, en cuestiones que la extracción de agua subterránea puede ser factible en los meses de infiltración, sin embargo, se tienen que tomar medidas para su extracción, ya que no es seguro que siga dando una propicia cantidad de agua cada cierto tiempo, por los diversos factores que la afectan.

### IV.4. Interpretación de los registros transitorios electromagnéticos

En la Figura IV-3 se expresa, que es una secuencia volcánica de la Formación Vizcaína, en la que se encontró el miembro volcánico epiclástico [definido aquí como un aglomerado piroclástico poco consolidado] definido por Geyne, Fries, y Probert, (1963), se infiere un fracturamiento moderado, con un espesor de aproximadamente de 40 m a una profundidad de 60 metros, siendo la roca volcánica de recarga en el sistema acuífero dentro del área de estudio.

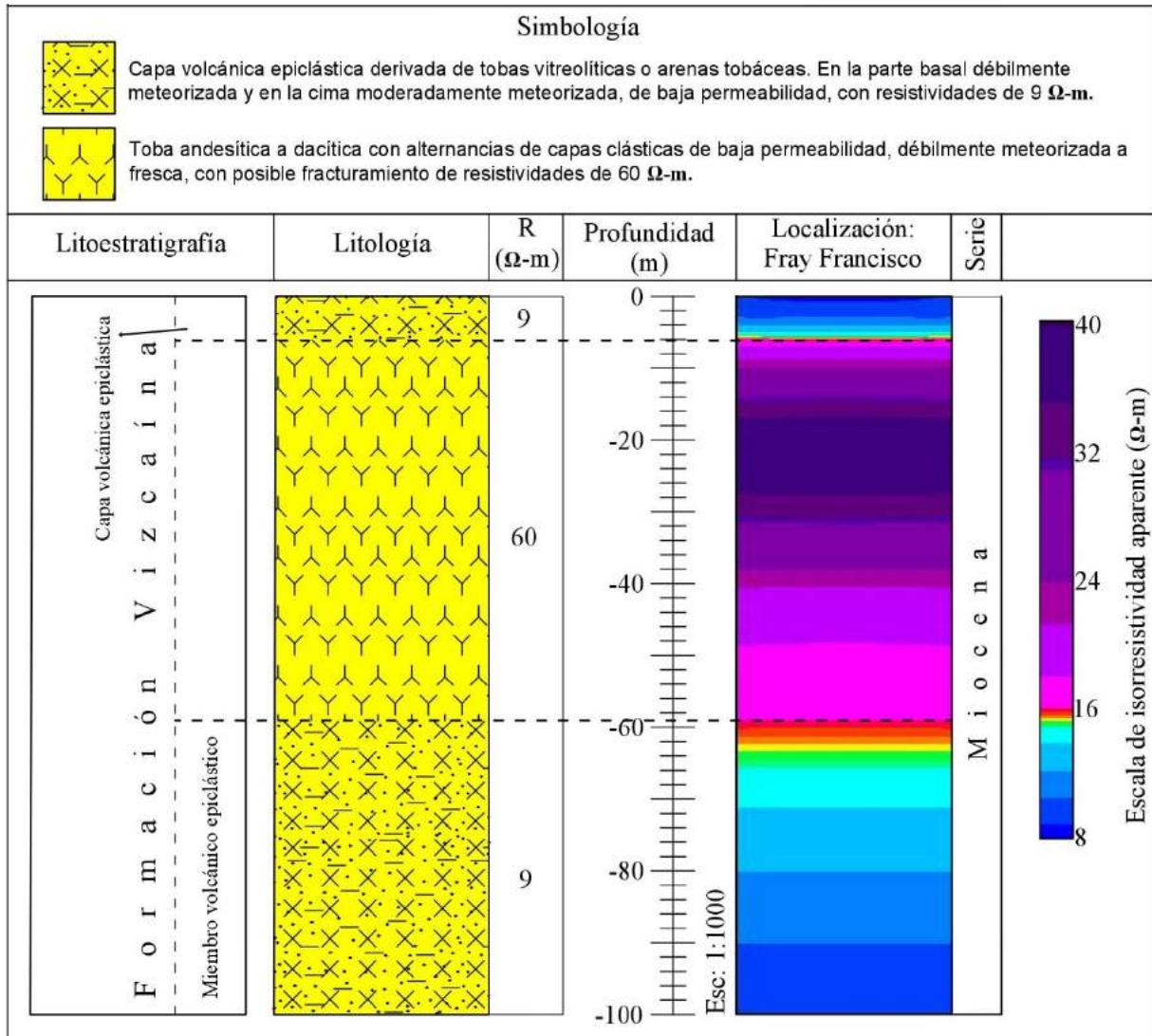


Figura IV-3. Interpretación geológica propia de TEM Fray Francisco, tomando resistividades de EPYESA (2017).

En la Figura IV-4 son dos registros TEM y representa el punto donde pasa cerca del cauce principal de la microcuenca Arroyo El Toril-La Mora, y se observa que las resistividades son bajas, además no existe algún decaimiento grande que indique gran paso del agua subterránea y de acuerdo con la interpretación litológica son rocas de material fino, sin embargo, se infiere un nivel de agua intermitente inferido, por lo cual, tiene relación a las fechas de infiltración y tiene una saturación baja de agua, también se sugiere que la disposición en la que descansan las rocas influye mucho al movimiento y ubicación del flujo de agua subterránea.

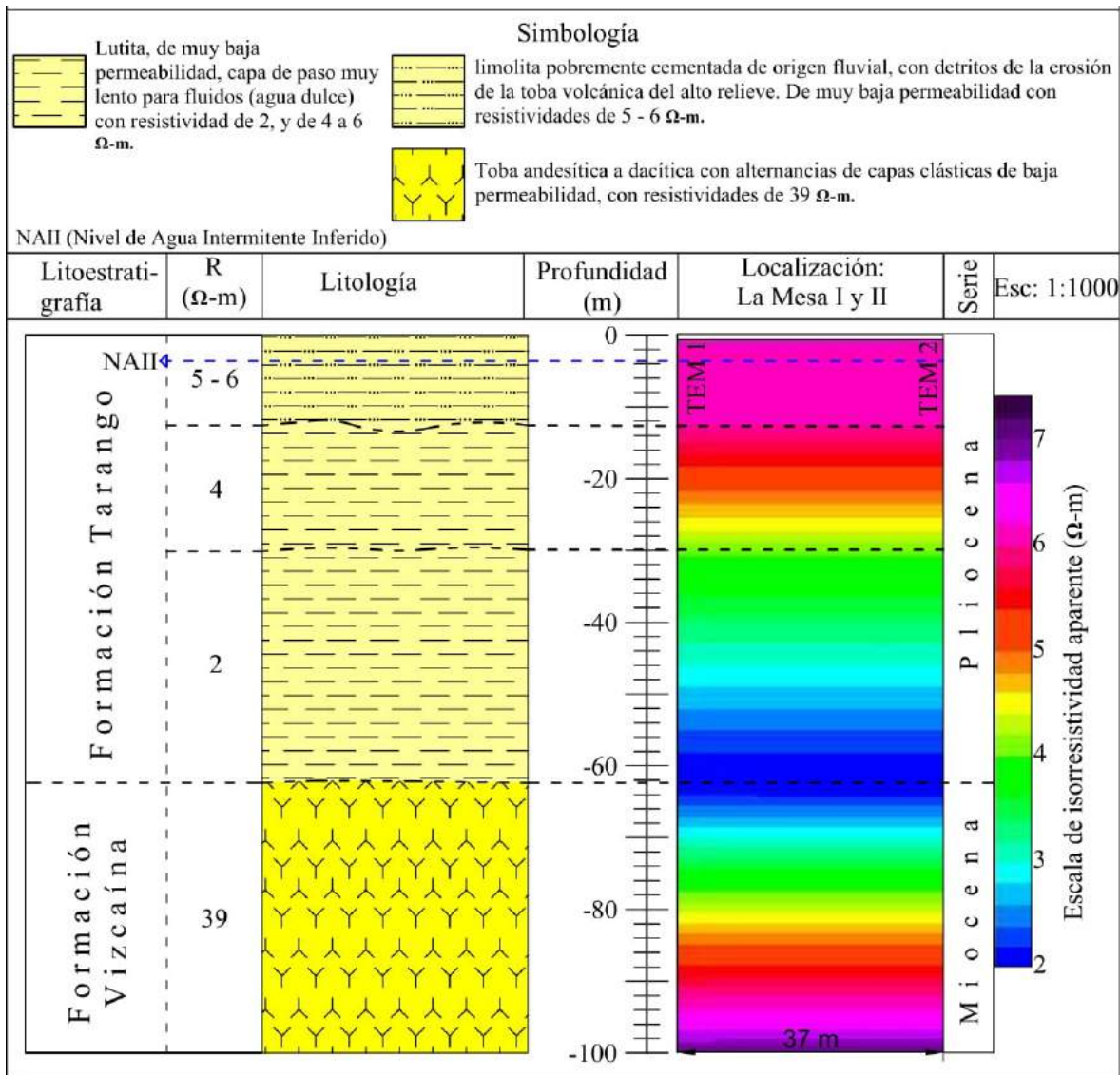


Figura IV-4. Interpretación geológica propia de TEM Mesa I y II, tomando resistividades de EPYESA (2017).



En la Figura IV-5, consiste en una capa arcillosa de un poco más de 40 m en base a sus muy bajas resistividades (1 a 2  $\Omega$ -m), en esta zona se puede observar que el material fino y sea indicador del centro de la microcuenca Arroyo El Toril-La Mora y en su cima se infiere un nivel de agua intermitente que continúa anterior a la Figura IV-4. Por tanto, se expresa que no es una posición propicia para realizar cualquier extracción de agua subterránea, sin embargo, a 250 m hacia el sureste pudiese ser un lugar prospecto para la canalización de agua superficial, ya que se encuentra en una corriente principal que descarga el agua.

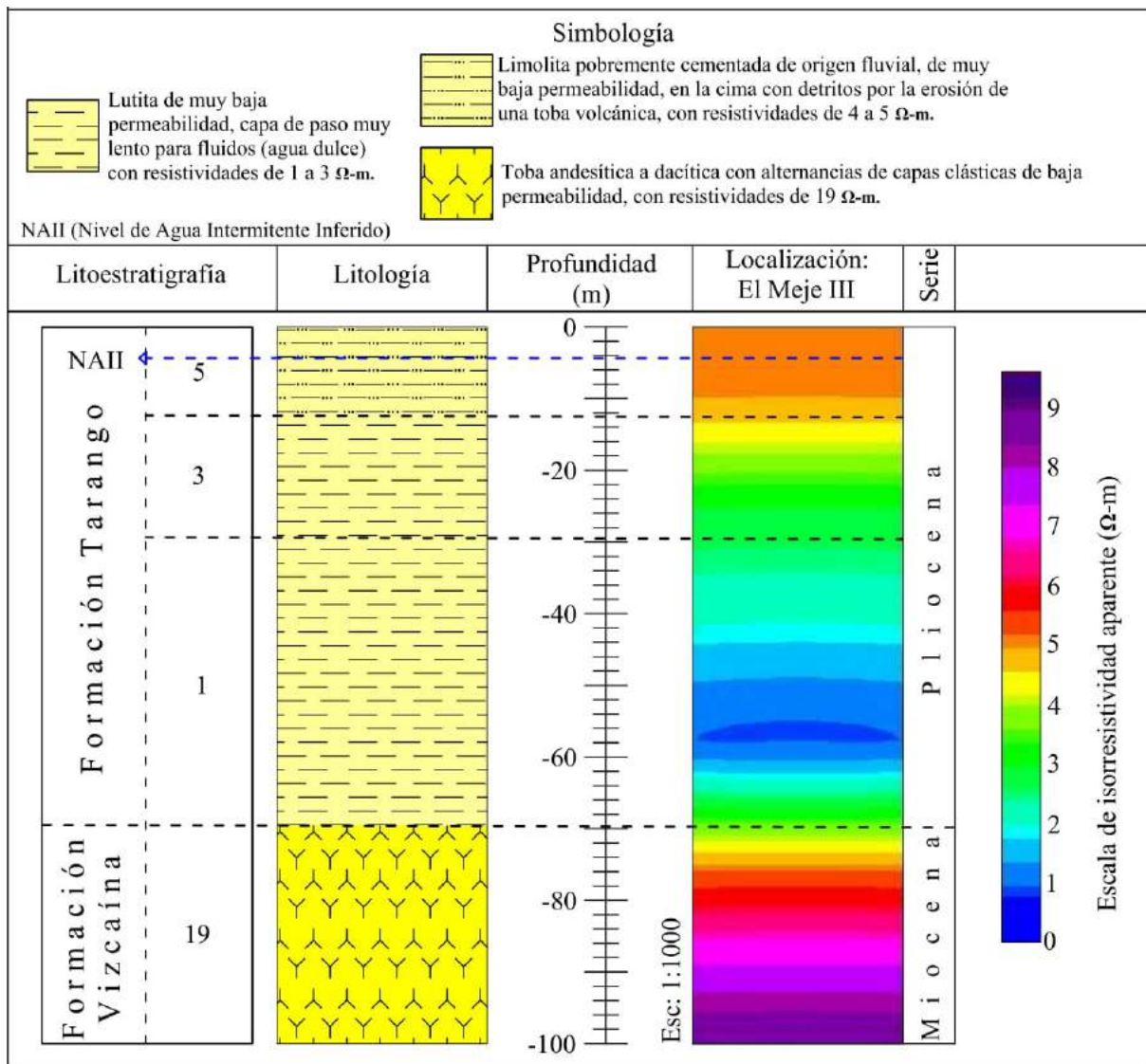


Figura IV-5. Interpretación geológica propia de TEM El Meje III, tomando resistividades de EPYESA (2017).

En la Figura IV-6 se tiene una inferencia de un flujo de agua salobre entre 5 y 6 m de profundidad (roca semisaturada a saturada), también se tiene una lutita de muy baja permeabilidad. Se hace una propuesta para perforación de pozo de agua controlado y se propone para una noria a 15 m de profundidad. El perfil indica que la parte basal tobácea que se vio anteriormente de la Fm. Vizcaína, se encuentra más abajo conforme a la estructura volcánica del suroeste (muy probable dirección de movimiento del agua subterránea) del TEM, que posiblemente fue un escarpe abanical fluvial.

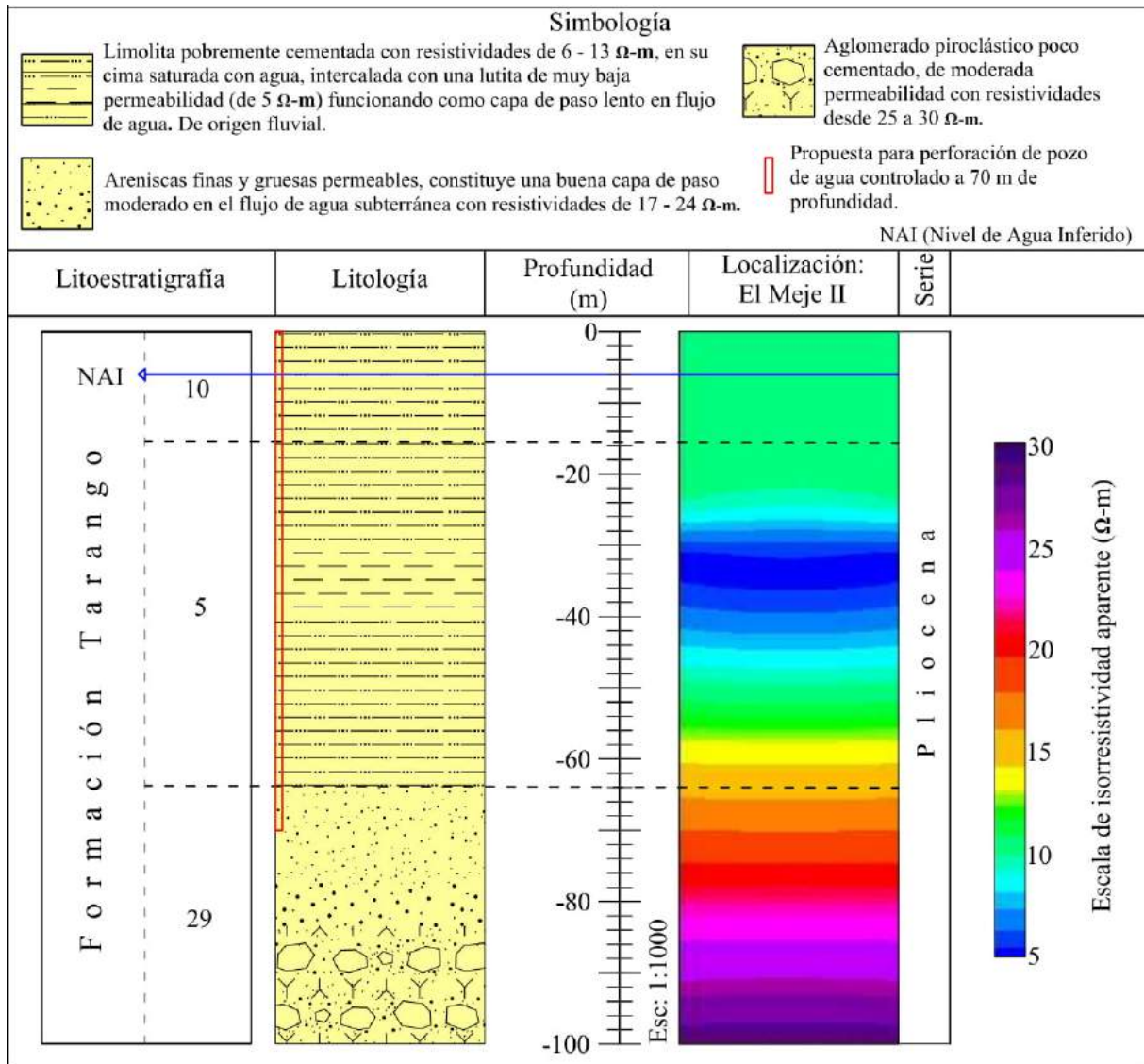


Figura IV-6. Interpretación geológica propia de TEM El Meje II, tomando resistividades de EPYESA (2017).



En la Figura IV-7 se describe el mismo flujo de agua salobre de la figura anterior, a una profundidad aproximada de 7 m, se describe que su basamento posiblemente sea la Formación Vizcaína que se encuentra de este lugar a 70 m hacia el suroeste, se propone noria a 15 m de profundidad.

Siguiendo las secuencias anteriores desde lo más alto a lo bajo, se caracteriza que la capa volcánica se erosionó, y por tanto se encuentra más abajo, e indica la forma de la estructura volcánica del suroeste, siendo un talud submorfológico de tipo abanical.

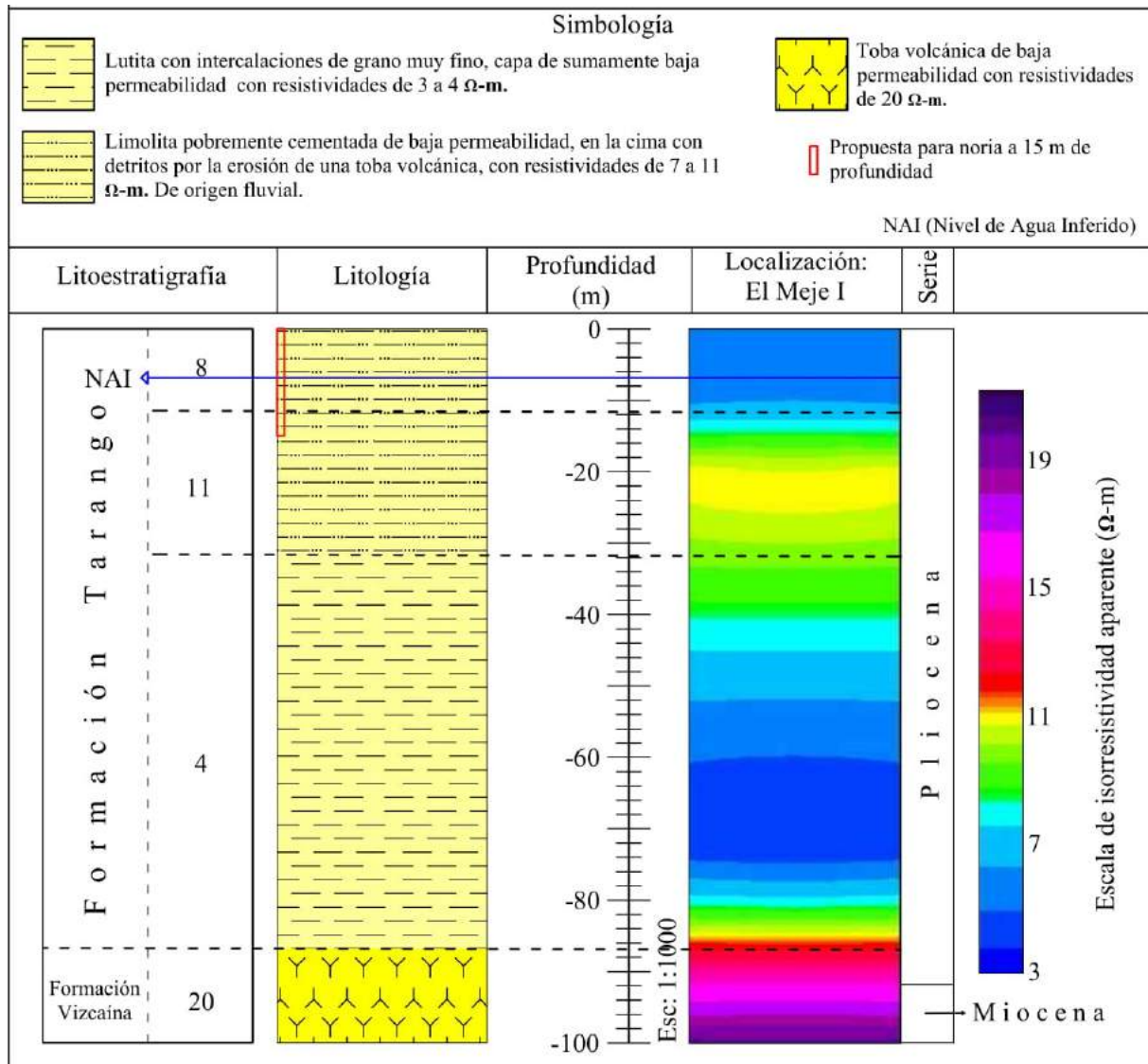


Figura IV-7. Interpretación geológica propia de TEM El Meje I, tomando resistividades de EPYESA (2017).

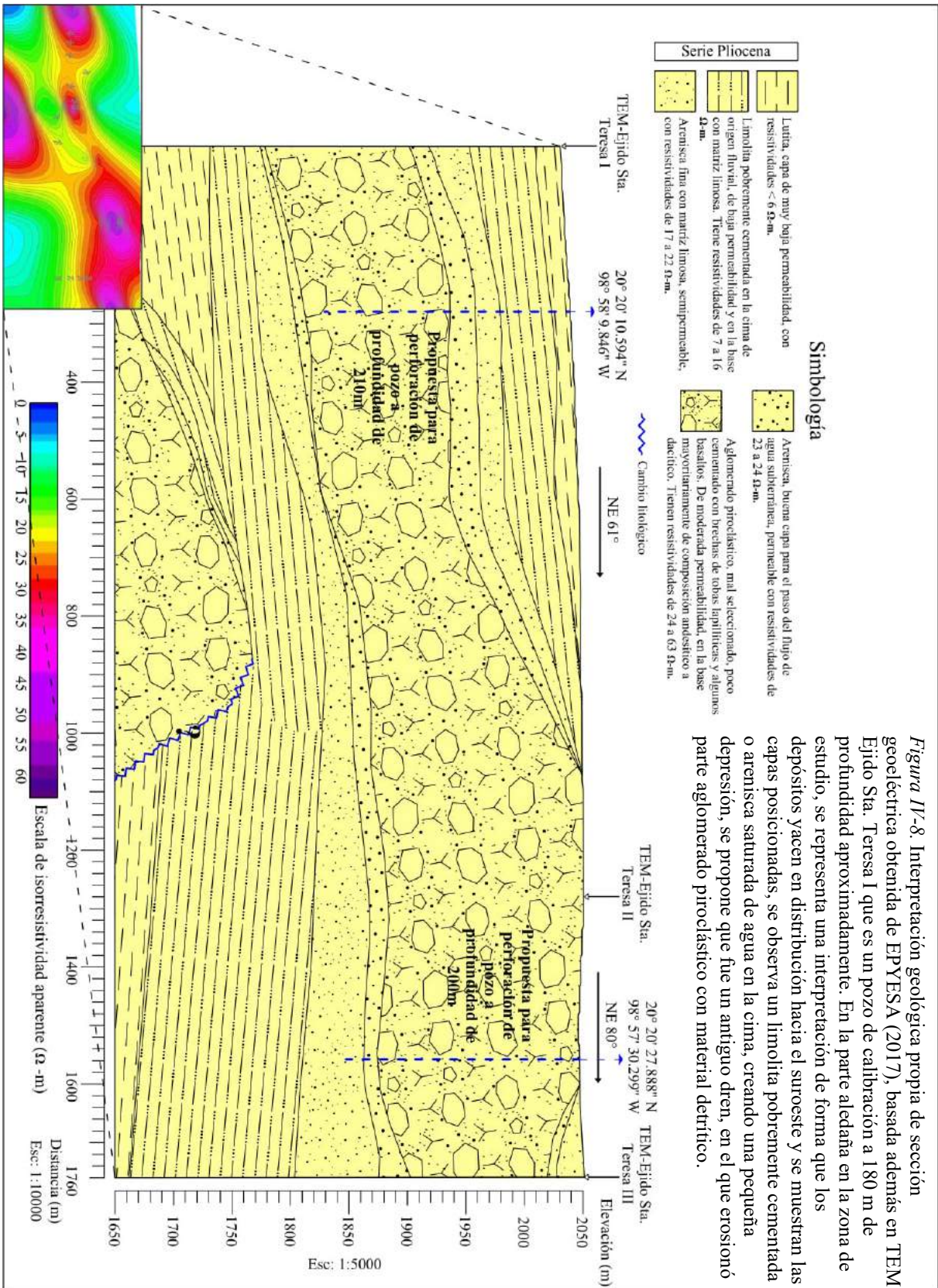


Figura IV-8. Interpretación geológica propia de sección geoelectrica obtenida de EPYESA (2017), basada además en TEM Ejido Sta. Teresa I que es un pozo de calibración a 180 m de profundidad aproximadamente. En la parte aldeaña en la zona de estudio, se representa una interpretación de forma que los depósitos yacen en distribución hacia el suroeste y se muestran las capas posicionadas, se observa un limolita pobremente cementada o arenisca saturada de agua en la cima, creando una pequeña depresión, se propone que fue un antiguo dren, en el que erosionó parte aglomerado piroclástico con material detrítico.



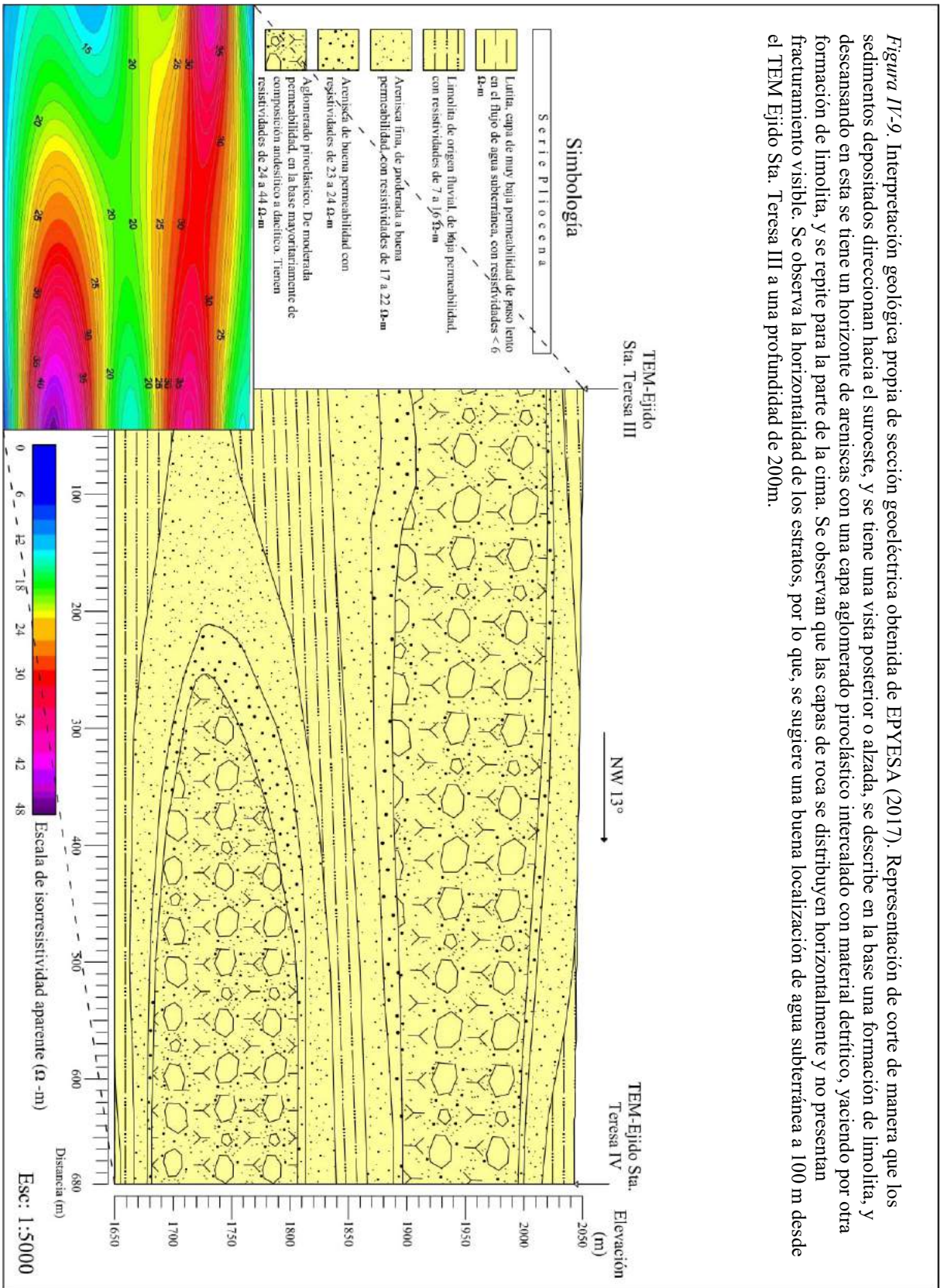


Figura IV-9. Interpretación geológica propia de sección geoelectrica obtenida de EPYESA (2017). Representación de corte de manera que los sedimentos depositados direccionan hacia el suroeste, y se tiene una vista posterior o alzada, se describe en la base una formación de limolita, y descansando en esta se tiene un horizonte de areniscas con una capa aglomerado piroclástico intercalado con material detrítico, yaciendo por otra formación de limolita, y se repite para la parte de la cima. Se observan que las capas de roca se distribuyen horizontalmente y no presentan fracturamiento visible. Se observa la horizontalidad de los estratos, por lo que, se sugiere una buena localización de agua subterránea a 100 m desde el TEM Ejido Sta. Teresa III a una profundidad de 200m.





## Capítulo V. Hidrogeología

En este capítulo se alude la importancia del agua subterránea como un sistema conformado por un flujo en varias direcciones y se toma como un agente geológico, debido a que influyen dentro de diversos y extensos factores que se interrelacionan con el agua en general, los procesos fisicoquímicos de las rocas y la solubilidad en estas. Se presenta una clasificación regional y local del flujo explicando los factores más importantes para determinar un orden y la relación que existe con los procesos del intemperismo en las rocas dentro del área de estudio.



Es necesario mencionar algunos conceptos básicos del agua subterránea y la relación que tiene como un sistema en el subsuelo:

Como se vio en el capítulo I dentro de los conceptos esenciales, se tiene pensado que las rocas de matriz fina como las arcillas son impermeables, sin embargo, contienen aún una muy pequeña permeabilidad en el que existe el paso del agua subterránea. Todas las rocas contienen una pequeña parte de agua y gas entre sus huecos (poros) y los minerales formados, por lo que, se define aquí un acuífero como “las rocas que contienen agua y permiten su paso a través de ellas”, y no está delimitado como se piensa en varios acuíferos (acuitardo, acuífugo, confinado, libre, etc.) ni por las mismas rocas (estratos de material fino, estructuras geológicas, geomorfología, etc.), ya que el mismo se presenta en un ciclo, un ejemplo, los prismas de acreción (estructuras de depósito acuñadas hacia donde existe subducción entre placas que convergen) que transportan el agua hacia la raíz continental y manto de la Tierra en un tiempo geológico debido a la gran temperatura y presión, se transforma en gas mezclándose con el magma, para volver ascender a la superficie o continuar con su transporte.

Un sistema acuífero se compone de un flujo único de agua subterránea en diferentes direcciones y es un mecanismo plausible para cualquier estudio hidrogeológico.

### **V.1. Clasificación del flujo de agua subterránea**

Para su clasificación se toma al flujo como un todo y un agente geológico, teniendo en cuenta la migración de los iones potenciales (cationes y aniones) con el ciclo del intemperismo (Chevotarev, 1955), que crean productos residuales y acumulativos. Los flujos de movimiento rápido en el agua subterránea transportan menos concentraciones salinas que los que viajan lento o excesivamente lento. También es de suma importancia la física, química y mecánica en

relación con las áreas regionales y locales, así como las zonas profundas basales en un medio geológico (Tóth, 1999).

### ***V.1.1.3. Flujo regional.***

En la Figura V-1, se representa una cuenca ideal para los diversos factores que afectan al flujo de agua subterránea en el ámbito regional, en la cual se tiene una secuencia de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, no obstante, sólo es representación general, ya que dentro de este parámetro contiene una gran variedad de complejidad geológica. Los principales factores son:

- La migración de las sales solubles (Chevotarev, 1955), en el que, el primer proceso interviene el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se genera en la biósfera, este se combina con el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y produce ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) cual, en la interacción con la superficie de la Tierra, produce  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  o hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) + bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ). El segundo, parte de una serie de numerosos procesos fisicoquímicos<sup>1</sup> relacionado con el ciclo del intemperismo, generan productos residuales (detríticos, siálicos y alíticos) y acumulativos (cloruro, sulfato, calcáreos y siálicos), que de forma tanto horizontal como vertical sigue la secuencia: Curso normal, el agua con  $\text{HCO}_3^{-1} \rightarrow \text{HCO}_3^{-1}-\text{Cl}^1 \rightarrow \text{Cl}^1-\text{HCO}_3^{-1} \rightarrow \text{Cl}^1-\text{SO}_4^{-2}$  o  $\text{SO}_4^{-2}-\text{Cl}^1 \rightarrow \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{Cl}^1$ , mientras que, en un curso reverso con los principales grupos geoquímicos es,  $\text{Cl}^1 \rightarrow \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{HCO}_3^{-1}$ .
- La relación que existe en la salinidad del flujo de agua subterránea con diversos factores; 1) Según los estudios de Chevotarev (1955), el gradiente hidráulico (la

---

<sup>1</sup> Véase los procesos en la capacidad de migración en sales solubles más a detalle en Chevotarev (1955, pp. 29-203).



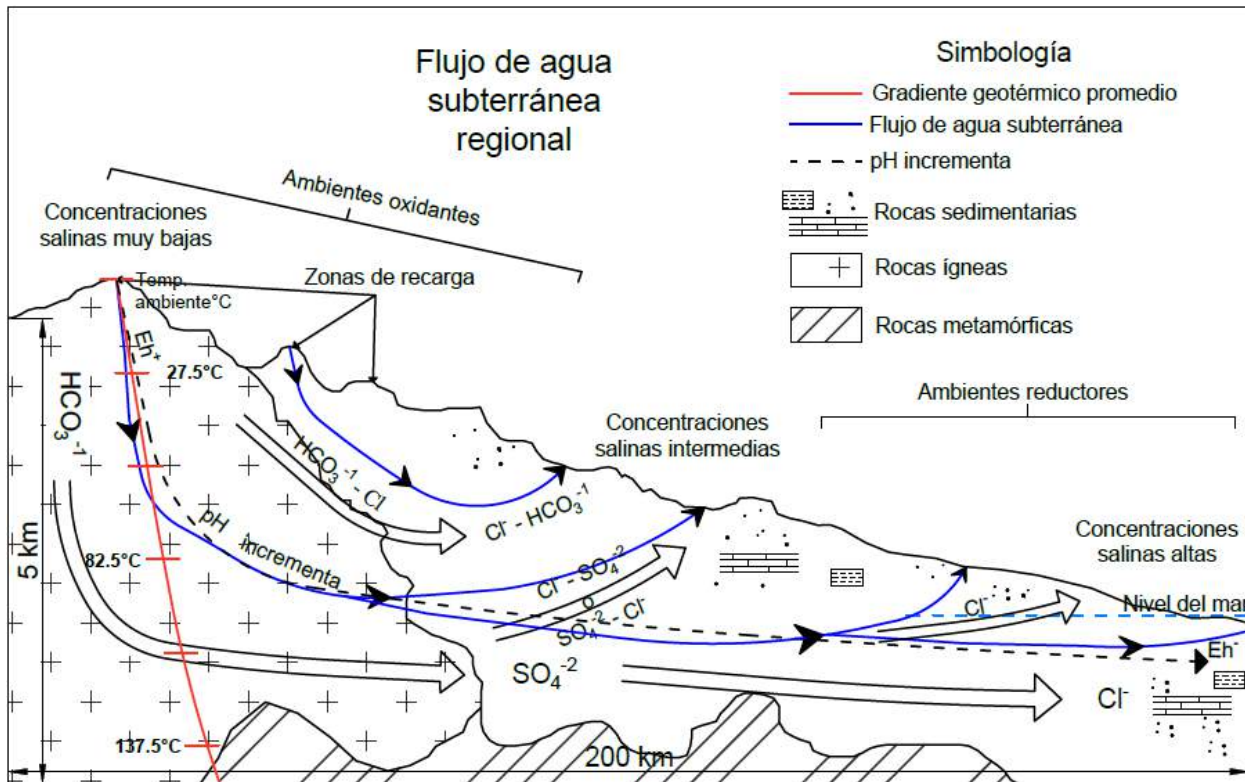


Figura V-1. Representación de un flujo de agua subterránea regional mostrando los diferentes factores que lo afectan. Elaboración propia, basado en autores (Chevotarev, 1955; Tóth, 1999).

presión de elevación del agua) depende del movimiento del flujo de agua subterránea, se sugiere que entre mayor sea el gradiente, existe menos concentración salina; 2) El pH, tiene la función de aumentar conforme a la dirección del flujo de agua subterránea y con el incremento de la profundidad, y así, si el pH se incrementa, su concentración salina también (Chevotarev, 1955; Tóth, 1999); 3) El gradiente geotérmico (Wikipedia, 2020) juega también una relación importante con las sales solubles en el agua subterránea, entre mayor sea la temperatura, más concentración salina, mientras que, menor sea, más baja será.

- Reacción óxido-reducción (Tóth, 1999); son las reacciones químicas en las que existe transferencia de electrones de un átomo a otro. El proceso de oxidación es la pérdida de electrones libres por la sustancia que se oxida, por el contrario, la reducción es la ganancia de electrones por la sustancia reducida. Si el Eh es

positivo se oxida (correlación con el pH ácido) y si es negativo se reduce (correlación con pH básico).

- El tiempo que tarda en transportarse el flujo de agua subterránea, depende de las formaciones geológicas, la topografía, y la profundidad principalmente, por lo que, en una zona regional el flujo puede tardar de miles hasta millones de años (Lenntech, 2020) en transportarse hasta la salida de este, o de un punto más alto a otro más bajo.

Entonces se propone una clasificación del flujo de agua subterránea a nivel regional del Estado de Hidalgo, por los principales factores que lo afectan; 1) en base al tiempo, proponiendo que el flujo tiene una velocidad de 0.001 m/día al recorrer aproximadamente 178 km, desde el punto más alto (Cerro de las Navajas) (Inafed, s.f., párr. 30) hacia el noreste para llegar al mar; 2) y la migración de las sales solubles (concentraciones salinas, que dan como producto  $\text{H}_2\text{O}$  con  $\text{HCO}_3^{-1} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  con  $\text{HCO}_3^{-1}-\text{Cl}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  con  $\text{Cl}^--\text{HCO}_3^{-1} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  con  $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{-2}$  o  $\text{SO}_4^{-2}-\text{Cl}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  con  $\text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  con  $\text{Cl}^-$ ) contra la distancia; 3) y el gradiente geotérmico con una profundidad sugerida. Por tanto, se toma la etimología latina (Mateos M., 1966) para suscitar un término adecuado (véase Tabla V-1).

Todo esto, en la comparación de todo tipo de agua subterránea, lacustre y oceánica (véase en Anexos Tabla A-4 y A-5)<sup>2</sup>.

La interrelación de los factores mencionados anteriormente proporcionó una gráfica (véase Tabla V-2), en la que se puede observar que cada 690 m de profundidad el gradiente geotérmico aumenta 20 °C en general (aunque es muy variable, dependiendo la zona), la

---

<sup>2</sup> Véase las relaciones de las tablas A-4 y A-5 en Anexos acerca de la localización geográfica y el promedio de las temperaturas de pozo, elevación, profundidad y distancia.

salinidad aumenta con la temperatura, profundidad y distancia (hacia el mar) y el tiempo es variable dependiendo la velocidad que viaje un flujo a través de las rocas hacia su descarga.

Tabla V-1. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel regional del Estado de Hidalgo. Elaboración propia.

Término	Fases	Sales solubles en agua subterránea	Significado	Salinidad total [ppm]	Tiempo	Distancia [km]	Profundidad [m]	Gradiente geotérmico [°C]
<i>Flutarlentus o Flutarlento</i>	I	$\text{HCO}_3^{-1}$	De las raíces del latín, <i>-flu</i> de <i>fluxus</i> <<flujo o fluido>>, <i>-tar</i> de <i>tardus</i> <<tardío>>, <i>-lent</i> de <i>lentatus</i> <<lento, prolongado>> y del sufijo <i>-us</i> << sing. masc. >>.	387	El flujo que permite el paso lento tardío generalmente de miles a quizá millones de años (dependiendo la distancia, la velocidad y profundidad del flujo).	178	600	17.39
	II	$\text{HCO}_3^{-1}\text{-Cl}^-$		4842		142	1200	34.77
	III	$\text{SO}_4^{-2}\text{-Cl}^-$ o $\text{Cl}^-\text{-SO}_4^{-2}$		4710		106	1800	52.16
	IV	$\text{SO}_4^{-2}$		8953		70	2400	69.55
	V	$\text{Cl}^-$		162890		35	3000	86.93

Relación de la distancia, el tiempo y salinidad de un flujo de agua subterránea en la región de Hidalgo

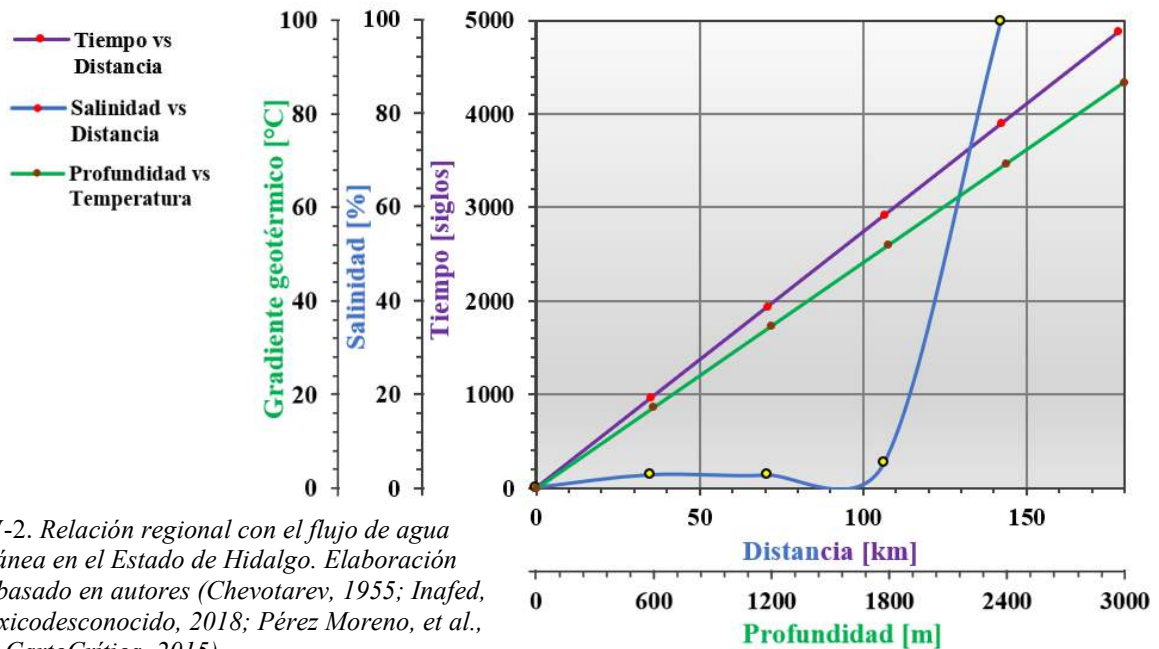


Tabla V-2. Relación regional con el flujo de agua subterránea en el Estado de Hidalgo. Elaboración propia basado en autores (Chevotarev, 1955; Inafed, s.f.; Méxicodesconocido, 2018; Pérez Moreno, et al., 2003; y CartoCrítica, 2015)

#### V.1.1.4. Flujo local.

En la figura V-2 se representa un sistema de flujo de agua subterránea a nivel local en una cuenca cualquiera para los diferentes factores asociados. Es de suma importancia la ubicación geológica y geográfica, para este caso situándonos en la clasificación de un *flutarlento* de entre fase I y II (véase Tabla V-1). Ésta sigue la secuencia de la concentración en sales

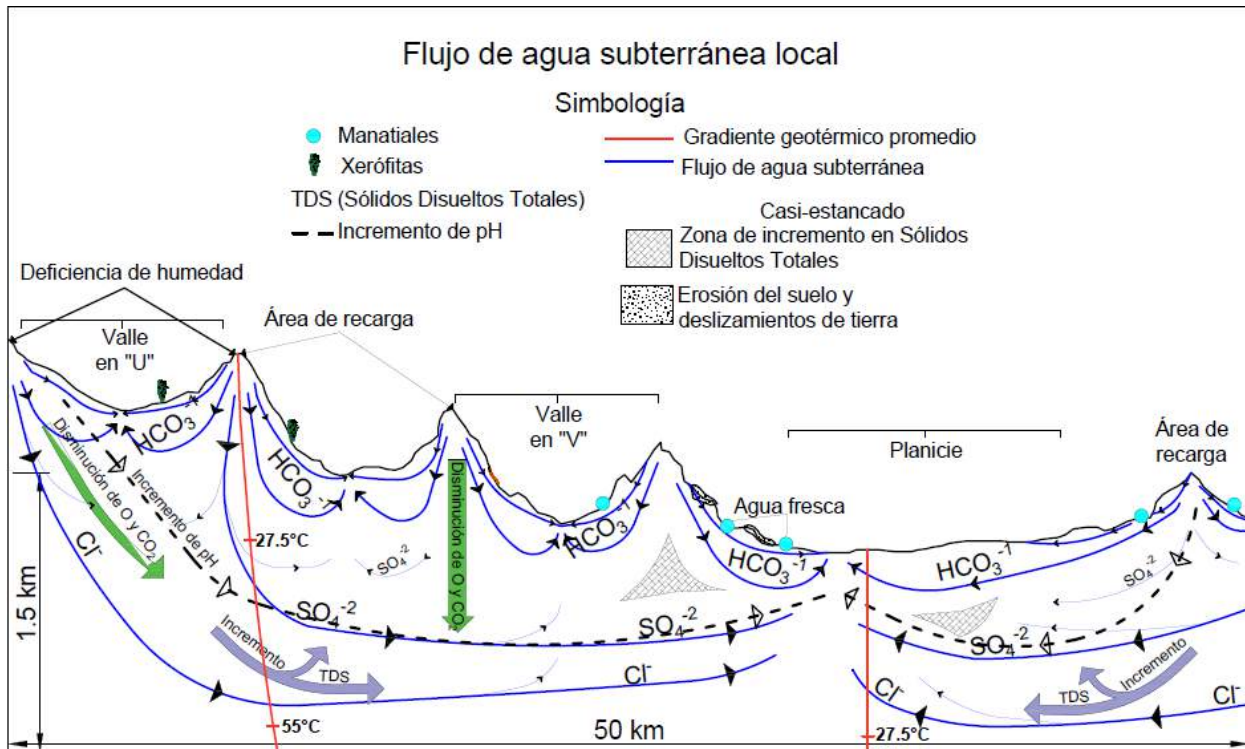


Figura V-2. Representación de un flujo de agua subterránea local mostrando los diversos factores que lo afectan. Elaboración propia, basado en autores (Chevotarev, 1955; Tóth, 1999).

solubles y los factores mencionados anteriormente en un ámbito regional, por lo que, se tienen las siguientes características pertinentes:

#### *Procesos químicos.*

La disolución es uno de los procesos más importantes en el agua subterránea, afecta a los gases y sólidos, entre los gases más comúnmente que interactúan con esta son, N<sub>2</sub>, Ar, O<sub>2</sub>, He, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S. El grado de disolución depende de la solubilidad de los minerales, presión y temperatura de la localidad. Las rocas más solubles son, la caliza (CaCO<sub>3</sub>), dolomita

( $\text{CaMgCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) y la halita ( $\text{NaCl}$ ), que sirven como fuente en la generación de Ca, Mg, Na, K,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua subterránea (Tóth, 1999).

Después, se tienen los ataques por ácidos en la roca, que contribuyen a la evolución química del agua subterránea, como lo son; el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido nítrico ( $\text{NO}_2$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y varios ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos). Más tarde, la reducción del sulfato se da debido principalmente por bacterias y contacto con la materia orgánica (carbón, lignito, petróleo), y como resultado lo remueven del agua subterránea (Tóth, 1999).

La migración de sales solubles se verán más afectadas en el flujo de agua subterránea por  $\text{HCO}_3^{-1}$  y  $\text{HCO}_3^{-1}\text{-Cl}^-$  de la Fig. V-2, sin embargo, siguiendo la secuencia verticalmente como menciona Chevotarev (1955) en los grupos principales geoquímicos del agua, en las zonas con menos profundidad en el subsuelo, tendrá agua con  $\text{HCO}_3^{-1}$ , después en las zonas intermedias, agua con  $\text{SO}_4^{-2}$  y las más profundas, agua con  $\text{Cl}^-$ .

Típicamente el contenido de los sólidos disueltos totales (por sus siglas en inglés, TDS, *Total Dissolved Solid*) se incrementan, el dióxido de carbono y el oxígeno disminuyen, el potencial redox cambia de positivo a negativo y el pH de ácido a básico, en la dirección del flujo y con el incremento de profundidad (Tóth, 1999).

#### *Procesos físicos.*

Intemperismo físico por acción de la tensión del agua, la gravedad y los esfuerzos. Actúan en la modificación de la geometría (deslizamientos de tierra, lahares, etc.) y forma del medio rocoso (valles en forma de “U” dados por erosión glacial y en forma de “V” por ambientes fluviales) o de depósito, éstas estructuras como fallas, fracturas, sedimentos no consolidados, conducen el agua subterránea a su amplio medio en el fondo rocoso, además, modifica la presión de los poros, reduciéndola o aumentándola (Toth, 1999).

### *Vegetación.*

En ocasiones la vegetación puede ser controlada o no por un flujo de agua subterránea, a través de sus efectos en la salinidad y humedad del suelo en el área. Cada planta es diferente en la cuestión de que puede tolerar cierta cantidad de sal y humedad, un ejemplo, son las xerófitas, plantas capaces de soportar períodos sin agua (sequías), encontrándose en regiones áridas o heladas (González, 2013; Tóth, 1999).

Se propone para el flujo de agua subterránea local, dentro del área de estudio en la región de Actopan, Hidalgo, en las fases II y III dentro de un sistema del *flutarlento*, siendo así clasificada (véase clasificación en la Tabla V-3)<sup>3</sup>. Se toma en cuenta la relación de la salinidad con la profundidad principalmente, y se consideran los siguientes factores:

- El tiempo es muy variable, dependiendo si la roca o el sedimento del cual pasa el agua a través de este (véase en anexos Tabla A-7) es de bastante complejidad heterogénea o es homogénea.
- La distancia también es variable con la alta y baja topografía, dependiendo el lugar ubicado geográficamente, ya que en la secuencia de la migración de sales solubles ocurre también horizontalmente.
- La elevación es correlacionable con la ubicación geográfica e indica en qué fase de salinidad regionalmente se puede encontrar el flujo.
- La profundidad se relaciona con la secuencia verticalmente en la migración de sales solubles, e indica la fase local de su salinidad, interrelacionado con los factores anteriores.

---

<sup>3</sup> Véase más detalle, la clasificación del agua subterránea local, en Anexos Tabla A-6.



Tabla V-3. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel local en una secuencia vertical de la migración de sales solubles contra la profundidad, dentro del área de estudio en la región de Actopan, Hidalgo. Elaboración propia, datos de salinidad en general tomados de Chevotarev (1955).

Término	Significado	Fases	Salinidad total		Grupos salinos	Profundidad [m]	<sup>a</sup> Elevación [msnm]	<sup>b</sup> Distancia [km]
			[ppm]	[%]				
<i>Korifluxus</i> o <i>Koriflujo</i>	De la palabra griega κορυφή - <i>Korifi</i> <<punto más alto y elevado>>, y de la raíz del latín - <i>flu</i> de <i>fluxus</i> <<flujo>>	I	387.40	0.24	Agua con HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	0 – 40	2,900 – 2,200	3 – 4
<i>Mesofluxus</i> o <i>Mesoflujo</i>	De la raíz griega μέσος <<mesos, medio >> y del latín - <i>flu</i> de <i>fluxus</i> <<flujo>>	II	4842.00	2.97	Agua con Cl <sup>-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	40 – 160	2,900 – 1,950	9 – 11
		III	4710.00	2.89	Agua con Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> o SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> -Cl <sup>-</sup>	160 – 630		> 11

Marcas en superíndices: <sup>a</sup> La elevación, es del punto más alto hacia el punto más bajo de la posible descarga de agua hacia la dirección de la ciudad de Actopan.

<sup>b</sup> La distancia y profundidad es sugerida, ya que es variable conforme a la morfometría de la cuenca dentro del área de estudio.

Se reitera que el sistema de flujo de agua subterránea dentro de la región de Actopan, Hidalgo, es uno sólo, no obstante, con diferentes características aludidas anteriormente, cómo un conjunto de elementos (fenómenos naturales) por un criterio (salinidad, profundidad) determinado.

## V.2. Formación de la cuenca en relación con el flujo de agua subterránea

En un principio se debe tomar en importancia la filosofía, que es la acción de un pensamiento o la reflexión, que tiene como fin responder grandes cuestiones, poner en duda lo que ya se conoce, por un análisis racional y coherente (Comte-Sponville, 2000).



Para la formación de un flujo de agua debe existir su transporte o movimiento, por un alto relieve y otro bajo, pero el agua siempre existió, sólo se movió durante su ciclo a través del paso de millones de años cuando ésta se originó como un líquido en la Tierra. Sin embargo, el flujo es el movimiento que realiza un líquido y siempre acompañado de una fuerza (gravitacional, física o química) que libera energía, por ello, la formación y origen del flujo se puede remontar en los inicios del origen del agua, pese a esto, se tiene una relación en el ciclo del agua y con el ciclo del intemperismo en las rocas.

En el área de estudio se tiene una pequeña cuenca sedimentaria rellena principalmente por la Formación Tarango, parte de la erosión de los clastos de las rocas volcánicas alrededor (formaciones Vizcaína y Corteza), y quizá una pequeña parte de rocas cretácicas (formaciones El Doctor y Méndez), por lo cual, generaron estructuras geológicas al momento de depositarse, dando como resultante un mecanismo para el desplazamiento del agua subterránea.

Para comprender la formación de la cuenca dentro del área de estudio, es preciso conocer su edad y hacer una correlación de los ambientes de depósito en los horizontes estratigráficos (estratos o capas) relaciona con el proceso del flujo de agua subterránea y el tiempo.

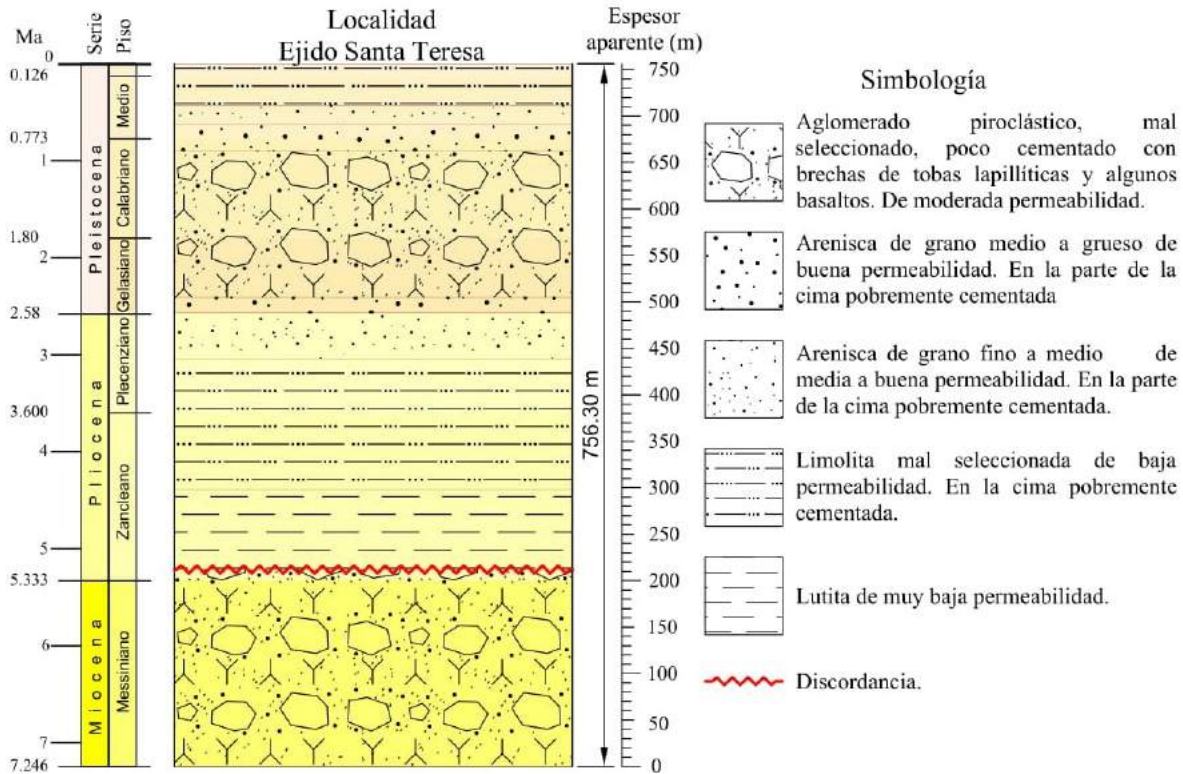
Según Suter et al. (1995a; citado en Suter, López Martínez, Quintero Legorreta y Carrillo Martínez, 2001) asigna que, la Formación Tarango es más joven que 7.1 Ma [edad Messiniana] basado en una edad de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (pág. 698) y varios autores (Fries, 1962, Castillo Cerón y Carranza Castañeda, 1994; citado en Suter, et al., 2001), “consideran que la parte superior de la Formación Tarango, basado sobre su fauna, es del período Cuaternario” (pág. 697).

En la Figura V-2 se presenta un balance estratigráfico (de la Fig. IV-8, Capítulo IV) de la parte aledaña al área de estudio que contiene el mayor espesor observable de la Fm. Tarango,

relacionando la edad, se tienen las siguientes interpretaciones en relación con el agua subterránea.

### Interpretación.

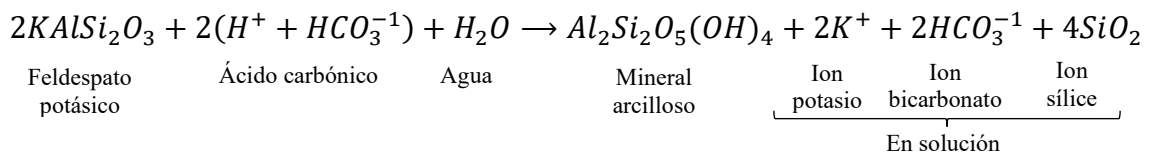
El basamento está conformado por un aglomerado piroclástico de acuerdo con Schmid, 1981 (ver, Diagrama A-1 en Anexos) de mala selección y poco cementado, de una edad



*Figura V-3.* Balance estratigráfico de la Fm. Tarango representado en una columna relacionando la edad, de Ejido Sta. Teresa, Actopan, Hidalgo, México. Elaboración propia

Messiniana, se infiere que terminó de formarse a los 5.2 Ma aproximadamente, se depositó en un ambiente volcánico intermedio (52 – 66 % de SiO<sub>2</sub>) cuyo transporte era principalmente fluvial y de gravedad en el que existía gran intemperismo. Debido a la discordancia erosional, se sugiere que era de un ambiente de alta energía, con posible actividad volcánica joven y fracturamiento. Esto nos indica, que el flujo de agua subterránea en ese entonces era rápido y procedió con un primer ciclo, en el que existió mucho intemperismo mecánico, acumulando productos de cloruros y sulfatos de las rocas andesíticas principalmente.

Después, cuando comenzó el depósito de material arcilloso en la edad Zancleana Media, el flujo de agua se tornaría lento y con más procesos químicos (mayor concentración de sales solubles) que físicos, como el intemperismo de las rocas andesíticas a dacíticas (De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta y Sánchez Bermeo, 1995) que contienen del 50% al 100% de feldespato potásico o alcalino, creando la siguiente reacción (Lutgens & Tarbuck, 2012):



Formando este material fino en la cuenca. Y revela que hubo un ambiente de muy baja energía, se infiere que no había mucha vegetación, por tanto, el medio de transporte de la erosión volcánica era eólica principalmente.

Continuó hasta que se depositaron clastos limo-arcillosos en la edad Plecenziana Media, en el cual fue de un ambiente de baja energía, el transporte era eólico y fluvial principalmente, el flujo de agua subterránea era un poco menos lento y generó el mismo aporte para el proceso de reacción de feldespatos a material fino mencionado anteriormente.

Más tarde, hasta la edad Gelasiana Temprana se depositaron arenas finas y medias y al último gruesas, con una selección media en clastos, estas indican que incremento el nivel energético del ambiente sedimentario, el movimiento del flujo de agua subterránea era moderado a rápido, este determina teóricamente que la concentración en sales solubles disueltas en el medio saturado eran bajas, y revela que en este estrato es favorable la extracción del agua para uso humano, ya que se puede extraer más cantidad y posible calidad por filtración natural.

De próximo, se observa que se repite el aglomerado piroclástico de la edad Calabriana Tardía, depositados por un ambiente de alta energía, que indica que la erosión fue



principalmente de origen fluvial y por gravedad, de igual manera, el flujo de agua subterránea tiene un movimiento moderado a rápido (las concentraciones salinas son menores), pero con posibilidad de mala calidad en el agua (TDS), ya que, no hay tanta filtración como en las arenas. Además, de que hay posibilidad de actividad volcánica y planos de ruptura con o sin movimiento.

En seguida, se repiten las areniscas de grano grueso a fino de edad Pleistocena Media, que muestra un nivel decreciente gradual en el ambiente energético, depositadas por acción fluvial principalmente, del cual el flujo es rápido, no obstante, descansa sobre un horizonte de material semipermeable y la cantidad de agua puede ser menor que la que se encuentra en la edad Gelasiana Temprana.

Por último, se repite una capa de limolita, este material limo-arcilloso depositado hasta la actualidad, se encuentra muy pobremente cementado, e indica que el ambiente actual es de baja energía, la erosión principalmente por acción eólica y fluvial, el flujo de agua es lento (mayor concentración salina, en este caso bicarbonato,  $\text{HCO}_3^{-1}$ ) y con mucho menor cantidad, que es la zona vadosa o de aireación (para la zona aledaña), del que la naturaleza (flora) toma el agua que necesite.



## Capítulo VI. Caracterización hidrogeológica

La importancia de tener una propicia caracterización hidrogeológica permite obtener la comprensión y conocimiento en el tema de agua subterránea, y la favorable aplicación en el uso para la extracción, consumo humano, industria, irrigación y todos los diferentes usos para nuestro recurso natural, por tanto, es de gran pertinencia hacer la descripción de la información integrada, interrelacionando los factores que afectan a la materia hídrica, así como su protección contra la contaminación antropogénica.



Una caracterización, que según la RAE (Real Academia Española, 2019), refiere del latín medieval *characterizare*, y este del griego *χαρακτηρίζειν charaktērízein*, como verbo se define; determina los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás. En el ámbito geológico, refiere a la descripción de recopilación y síntesis de información, estudios previos, la geología, hidrología y geofísica respecto con el agua. Al presente, es preciso tomar las relaciones de los capítulos anteriores para determinar atributos peculiares en el agua subterránea dentro del área de estudio.

### VI.1. Relación de la zona de recarga con el riego de agua residual urbana

Una de las características generales en el área de estudio es la altitud media topográfica respecto con el nivel del mar (véase Fig. VI-1), siendo una zona potencial de la recarga en el sistema acuífero. Se tiene una porción del Cerro Grande que conforma más de la mitad del relieve, en el norte con 2,620 msnm y en la parte sur con 2,570 msnm.

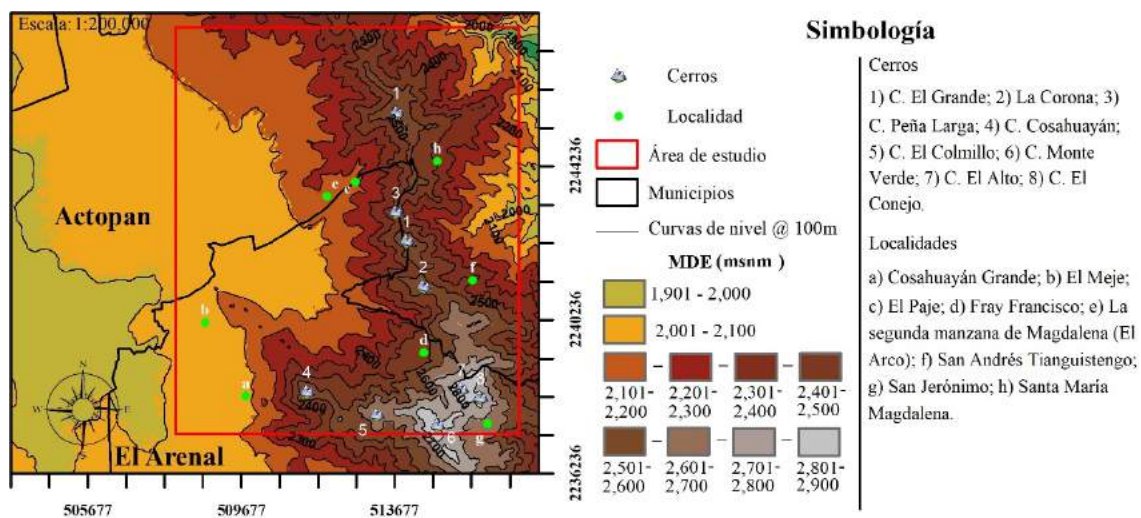


Figura VI-1. Representación de la altitud en el área de estudio en Actopan, Hidalgo. Elaboración propia.

De acuerdo con los estudios realizados por Gallegos et al. (1999) mencionan que, en el Valle del Mezquital (que forma una pequeña parte del área de estudio) contiene un gran esquema en la utilización de riego en la agricultura con agua residual urbana, a veces mezclada (agua

residual 80% y de lluvia 20%). Desde el año 1995 se realizaron perforaciones con profundidades de 7.5 a 50m bajo el nivel del subsuelo, haciéndose varias pruebas hasta 1997; Total (TS), suspendido (SS) y sólidos disueltos (DS), (209, A, B, D, F), nitrógeno N03-N (418, C), N02-N (419), fósforo total y ortofosfatos (424, C, E), total y fecal coliformes (908, A, C) y patógenos bacterianos (*Salmonella*, *Shigella* y *Vibrio cholerae*) (912, A, B, G). Por lo que, obtuvieron resultados (véase Tabla VI-1 y VI-2) de esto, donde “cfu” (por sus siglas en inglés *colony-forming unit*) es la unidad formadora de colonias (sirve para determinar el número de bacterias en una muestra) y “gdw” (por sus siglas en inglés, *gram dry weight*) peso seco por gramo (parámetro para las bacterias).

Tabla VI-1. Concentraciones de coliformes totales y fecales en los sedimentos subsuperficiales desde varias profundidades en Tula y Actopan, Valle del Mezquital (Gallegos, et al, 1999, pág. 47)

Localidad	Profundidad [m]	Coliformes Totales [cfu/gdw]	Coliformes Fecales [cfu/gdw]
Tula	3.5-5.0	$2.3 \times 10^3$	$9 \times 10^3$
	6.0-7.5	$1.1 \times 10^4$	$4.6 \times 10^4$
	2.5-4.0	$9.3 \times 10^3$	$1.1 \times 10^3$
	9.0-10.5	$>2.4 \times 10^4$	$>2.4 \times 10^4$
	11.5-13.0	$9 \times 10^1$	$9 \times 10^1$
Actopan	14.0-15.5	$>2.4 \times 10^4$	$<3 \times 10^1$
	16.5-18.0	$2.1 \times 10^2$	$4.3 \times 10^2$
	20.0-21.5	$2.1 \times 10^2$	$<3 \times 10^1$
	23.5-50.0	$>2.4 \times 10^4$	$4 \times 10^1$

Como consecuente, se puede observar que la contaminación por coliformes totales y fecales es alta por el riego con el agua residual urbana, afectando más a las profundidades someras del agua subterránea, en las localidades de Actopan y C. Colorado principalmente. Dentro del área de estudio se presenta una zona de recarga en casi la totalidad de su superficie, la relación que existe con el riego de agua residual es la afectación de la calidad del agua subterránea, donde en las partes más someras se encuentran generalmente las norias, y ocurre la lixiviación del material dentro del subsuelo, acarreado la contaminación, a pesar de que la mayor parte de la eliminación de los componentes microbianos ocurre en los 2 m superiores de

la zona vadosa (Gallegos et al., 1999). Además, se deduce que las zonas de material fino (arcillosas) se relacionan con la proliferación de bacterias en las áreas húmedas o estaciones con gran precipitación.

Tabla VI-2. Concentraciones de coliformes totales y fecales en el agua subterránea de las perforaciones dentro del área de riego de agua residual en el Valle del Mezquital para cada perforación. La primera profundidad corresponde al nivel freático (metros bajo el nivel del suelo) (Gallegos, et al, 1999, pág. 48)

Concentraciones de coliformes fecales [cfu/100 ml]										
Localidad	Profundidad [m]	Meses de febrero de 1996 a enero de 1997								
		Feb	Abril	My <sup>b</sup>	Jun <sup>b</sup>	Ag <sup>b</sup>	Sept <sup>b</sup>	Oct	Nov	Ene
<sup>a</sup> Cerro Colorado	7	240	43	<3	<3	43	460	43	93	150
	25	<3	<3	<3	<3	<3	23	23	<3	<3
Tula	7	nd	<3	<3	<3	>3	>2400	<3	<3	<3
	37	nd	<3	<3	<3	<3	93	<3	<3	4
Actopan	7	nd	4	<3	<3	<3	<3	<3	>2400	<3
	30	nd	<3	<3	<3	<3	4	<3	<3	<3
El Arenal	7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	<3
Concentraciones de coliformes totales [cfu/100 ml]										
<sup>a</sup> Cerro Colorado	7	1100	240	240	240	43	>2400	43	11	460
	25	7	72400	<3	<3	4	23	240	<3	<3
Tula	7	nd	7	<3	<3	<3	>2400	43	<3	23
	37	nd	<3	4	4	<3	>2400	240	93	210
Actopan	7	nd	460	<3	7	4	240	<3	>2400	9
	30	nd	7	<3	4	<3	9	<3	<3	<3
El Arenal	7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	<3

Marcas en el superíndice: <sup>a</sup> Cerro Colorado de Actopan, Hidalgo; <sup>b</sup> Meses en la

temporada de lluvias.

## VI.2. Modelos conceptuales

En los siguientes modelos conceptuales hidrogeológicos se representa la litología de la cuenca del área de estudio, su forma y cómo afectan las cuestiones hidrológicas a ésta, también se muestra la distribución del agua subterránea, la interpretación de cómo es que ocurre el movimiento del flujo de agua a través de las rocas, su clasificación y el nivel de saturación de agua.

El modelo A-1 es una tercera parte de la sección A-A' del Mapa I (véase en Anexos) localizada en la porción este del municipio de Actopan, colinda con la localidad El Rincón, El Arenal. Su base litológica se conforma de la Fm. Vizcaína que van desde miembros volcánicos

epiclásticos intercalados con lapillitas y brechas piroclásticas<sup>1</sup>, después se tiene tobas líticas y brechas, toda la formación posiblemente fracturada, continúa descansando la Fm. Tarango, compuesta por un aglomerado piroclástico y en su cima por limolitas y, por último, se tiene a la Fm. San Cristóbal [inferida] constituida por basaltos. Esta pertenece a la microcuenca hidrográfica Arroyo El Toril-La Mora contando con una infiltración media anual de 10,028,390.8450 m<sup>3</sup> de agua, su clima es de templado a subhúmedo y en la zona tiene una inclinación promedio del 4.5 %, es decir, aproximadamente 2.83° resultado de un relieve ligeramente inclinado. El movimiento que ocurre en el agua subterránea localmente en base a la topografía y las zonas con alta vegetación indican que fluye de este a oeste en la parte somera. Se clasifica en un *koriflujo* y *mesoflujo* fase II, del cual tiene agua con bicarbonato en la parte

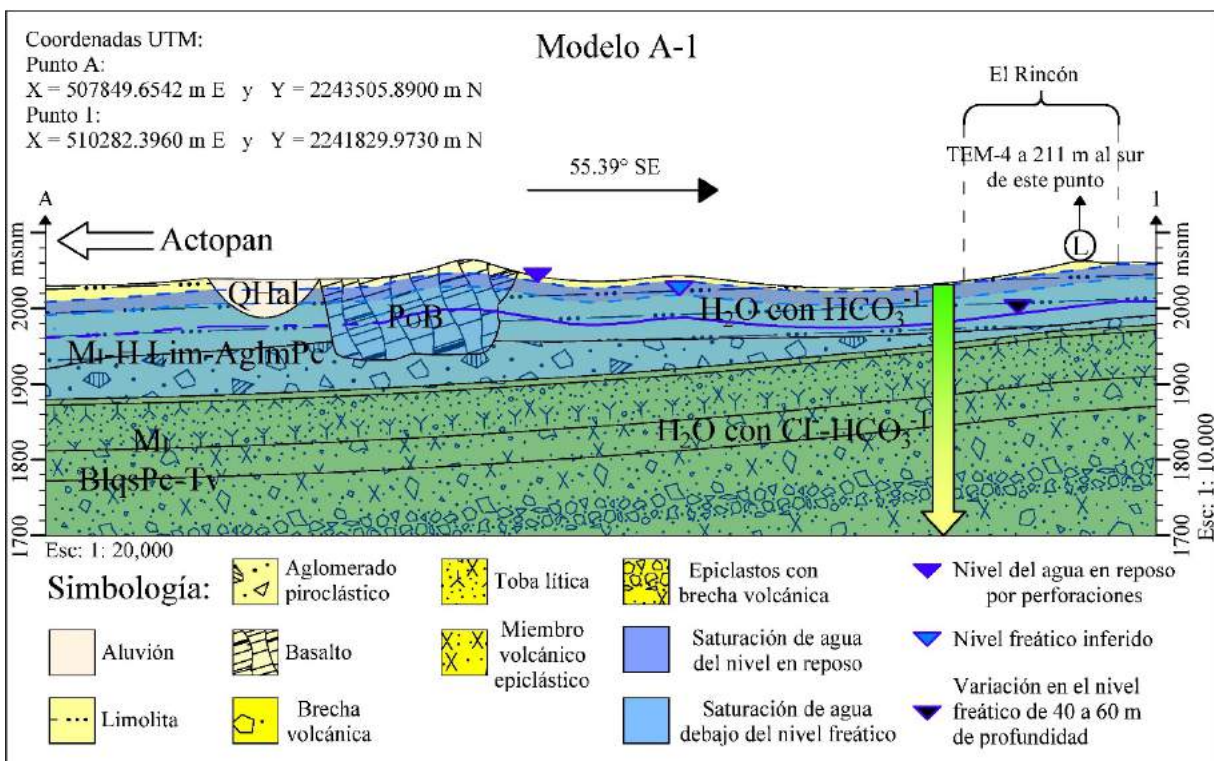


Figura VI-2. Modelo conceptual hidrogeológico A-1. Elaboración propia.

somera y agua con cloruro-bicarbonato en la porción intermedia según su profundidad. El nivel

<sup>1</sup> Véase clasificación de rocas piroclásticas en Anexos de acuerdo con Schmid (1981)



en reposo del agua corresponden a datos (EPYESA, 2019) según perforaciones y varía de acuerdo con SEGOB (2016) en la localidad “El Rincón” de 40 a 60m.

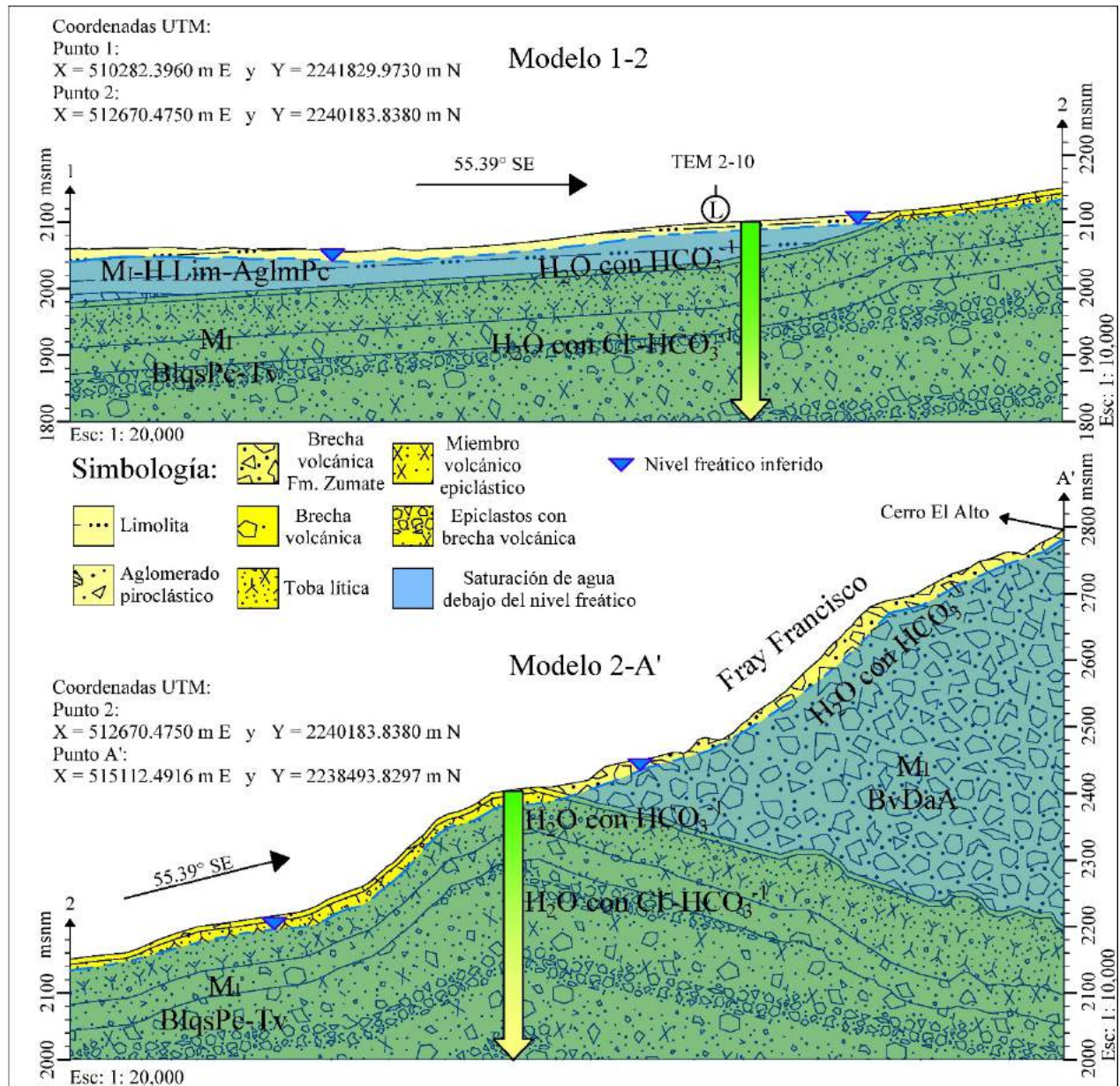


Figura VI-3. Modelo conceptual hidrogeológico 1-2 y 2-A'. Elaboración propia.

La continuación del modelo A-1 es el modelo 1-2 y 2-A'. La diferencia es que el primer modelo 1-2; se acuña la Fm. Tarango con la Fm. Vizcaína, constituida principalmente por limolitas y una capa de lutitas de aproximadamente 20 a 40 m de espesor; tiene una pendiente promedio del 10%; el movimiento del agua subterránea que ocurre en la zona somera es de este

a oeste; se clasifica en un *koriflujo*, ya que contiene más agua con bicarbonato que con cloruros y se considera una zona de recarga del sistema acuífero; se infiere un nivel freático de 15 a 20 m de profundidad desfasando a su superficie. El modelo 2-A', se acuña la Fm. Vizcaína con la Fm. Zumate (constituida principalmente por brecha volcánica mal clasificada en tamaño de grano); tiene una pendiente promedio aproximadamente del 25%, siendo un relieve accidentado y escarpado; se clasifica en un *koriflujo* teniendo la mayor parte de agua con bicarbonato, es la zona principal de recarga de la microcuenca hidrográfica; se infiere un nivel freático de 10 a 15 m de profundidad respecto a su superficie, determinado en base al relieve y vegetación principalmente.

El modelo B-B'-1 es la mitad de la sección B-B'' del Mapa I (véase en Anexos), donde se representa la dirección opuesta a la sección A-A' e intervienen los registros transitorios electromagnéticos y algunos datos de los niveles de agua en reposo de las perforaciones cercanas al área de estudio, por lo que, ese nivel en reposo se logra desde profundidades que van desde los

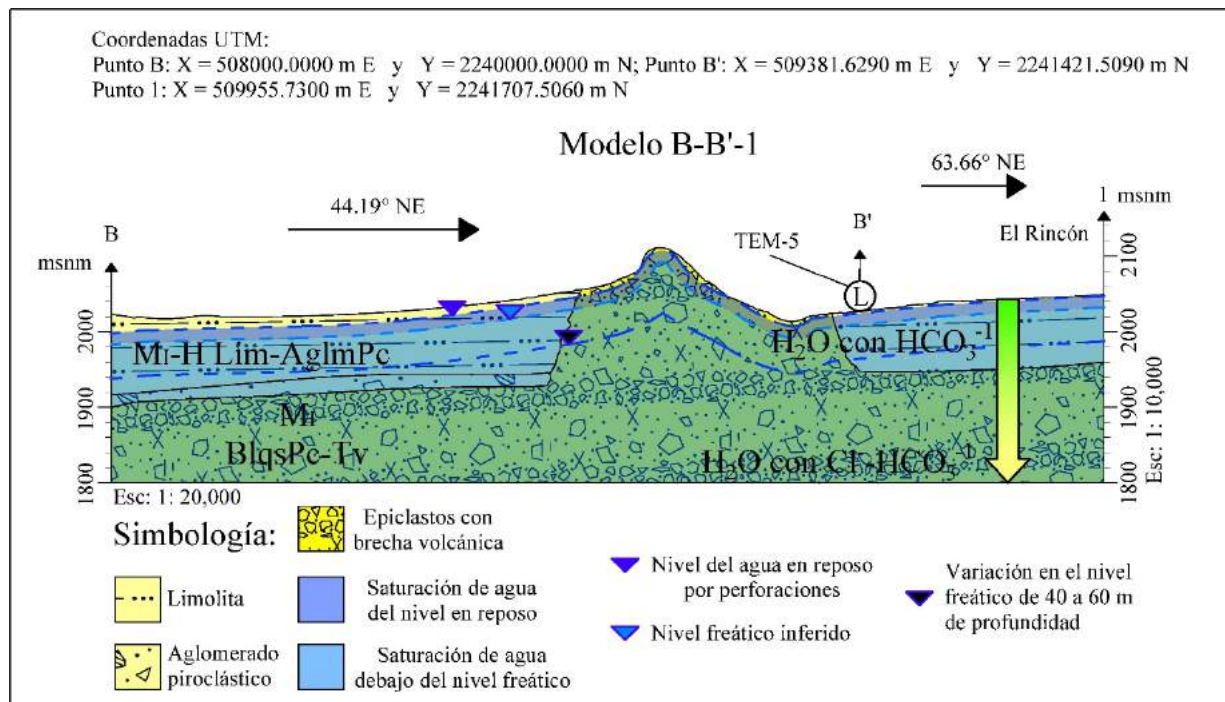


Figura VI-4. Modelo conceptual hidrogeológico B-B'-1. Elaboración propia.



100 a 170 m. Existe una pequeña diferencia en el contraste donde se depositó la Fm. Vizcaína y se observa que esa cresta en particular tiene propiedades más consistentes, de lo cual, quedó como una pequeña elevación; tiene la misma clasificación de flujo de agua subterránea local que el modelo A-1; y la variabilidad en el nivel freático se infiere que es de 20 a 50 m de profundidad desfasando su superficie.

El modelo 1-B''-B''' es la segunda mitad de la sección B-B''' del Mapa I (véase en

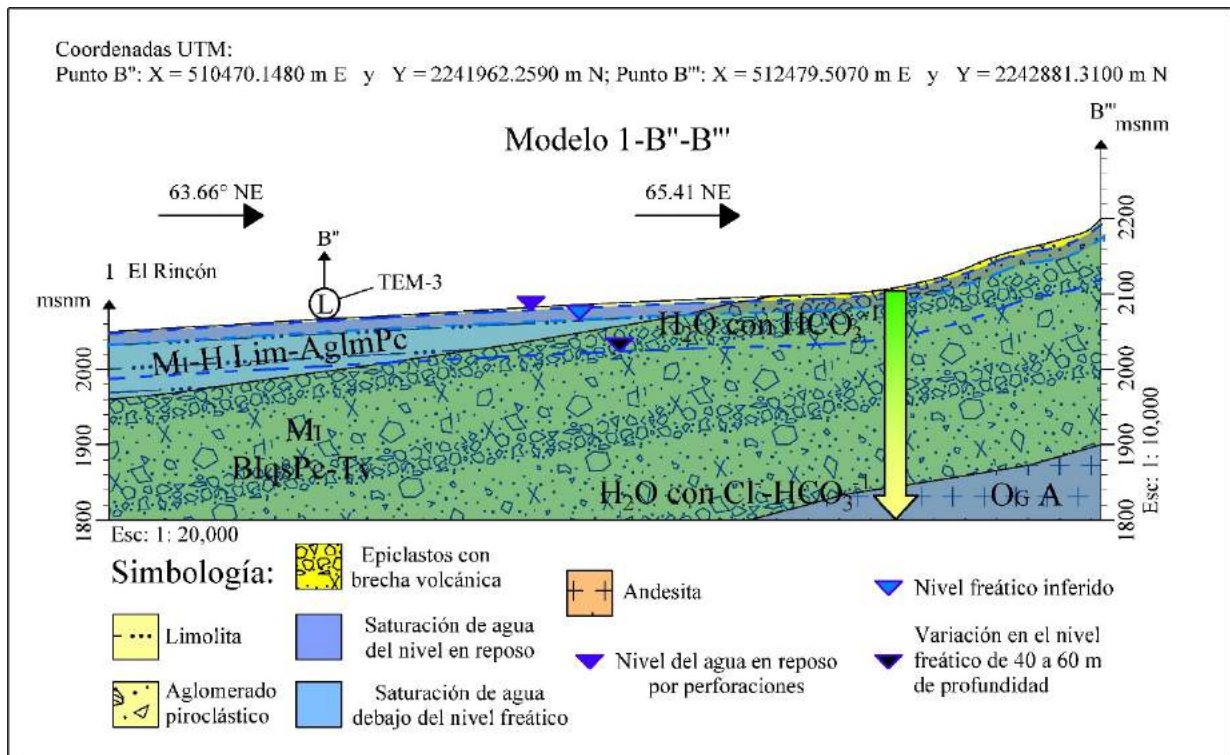


Figura VI-5. Modelo conceptual hidrogeológico 1-B''-B'''. Elaboración propia.

Anexos). Difiere con un mayor relieve hacia el noreste, se acuña la Fm. Tarango con Vizcaína y en la parte basal está la Fm. Corteza compuesta por una andesita posiblemente muy intemperizada, estando en proceso de transformación a minerales arcillosos, por tanto, el agua subterránea en esa formación ocurre lentamente.

Aquí se hace mención, que tanto para los anteriores modelos conceptuales, la zona local no es muy variable y se expresa que la diferenciación en el nivel freático del agua subterránea es

debido al clima, en las épocas de precipitación a unos cuantos metros y en las épocas secas o de cese a unas pocas decenas de metros. El flujo de agua subterránea ocurre en diferentes velocidades en relación con el tipo de roca; su porosidad, permeabilidad, fallamiento y fracturamiento.

La Fig. VI-6 es una representación 3D<sup>2</sup> en una vista SW de la caja roca, encontrándose en las coordenadas UTM:  $X_1= 508072.2813$ ,  $X_2= 513510.2187$ ,  $Y_1= 2239095.0000$ ,  $Y_2=$

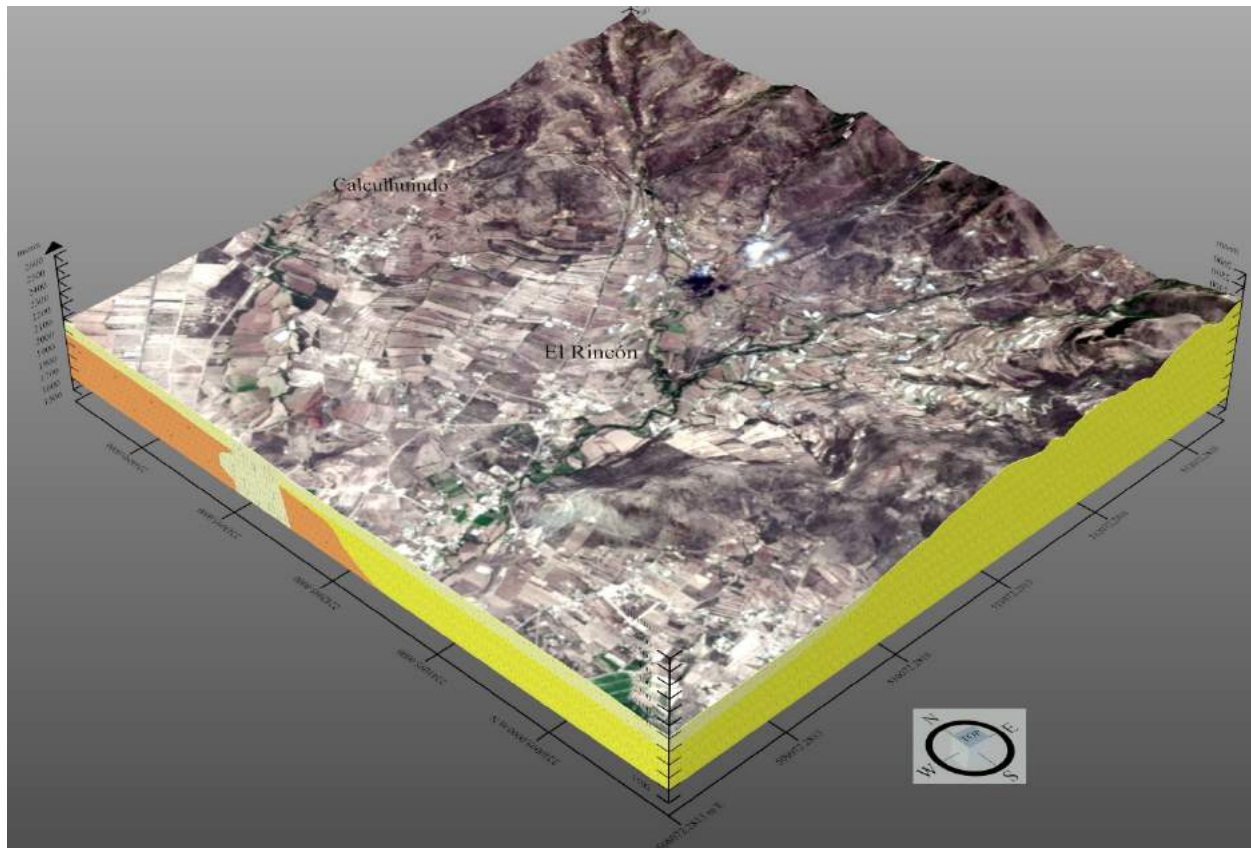


Figura VI-6. Imagen renderizada del modelo 3D del relieve terrestre, en la porción centro de Actopan, Hidalgo. Elaboración propia, imagen del sensor Sentinel2 (EESA, 2017).

2244855.0000, de una gran parte del área de estudio cerca de la localidad El Rincón, donde se encuentra la cuenca de Actopan.

<sup>2</sup> Para observar el modelo 3D en su totalidad véase en digital-disco Anexos Modelo conceptual hidrogeológico preferentemente por medio del software AutoCAD o alguno que maneje archivos con extensión DWG.

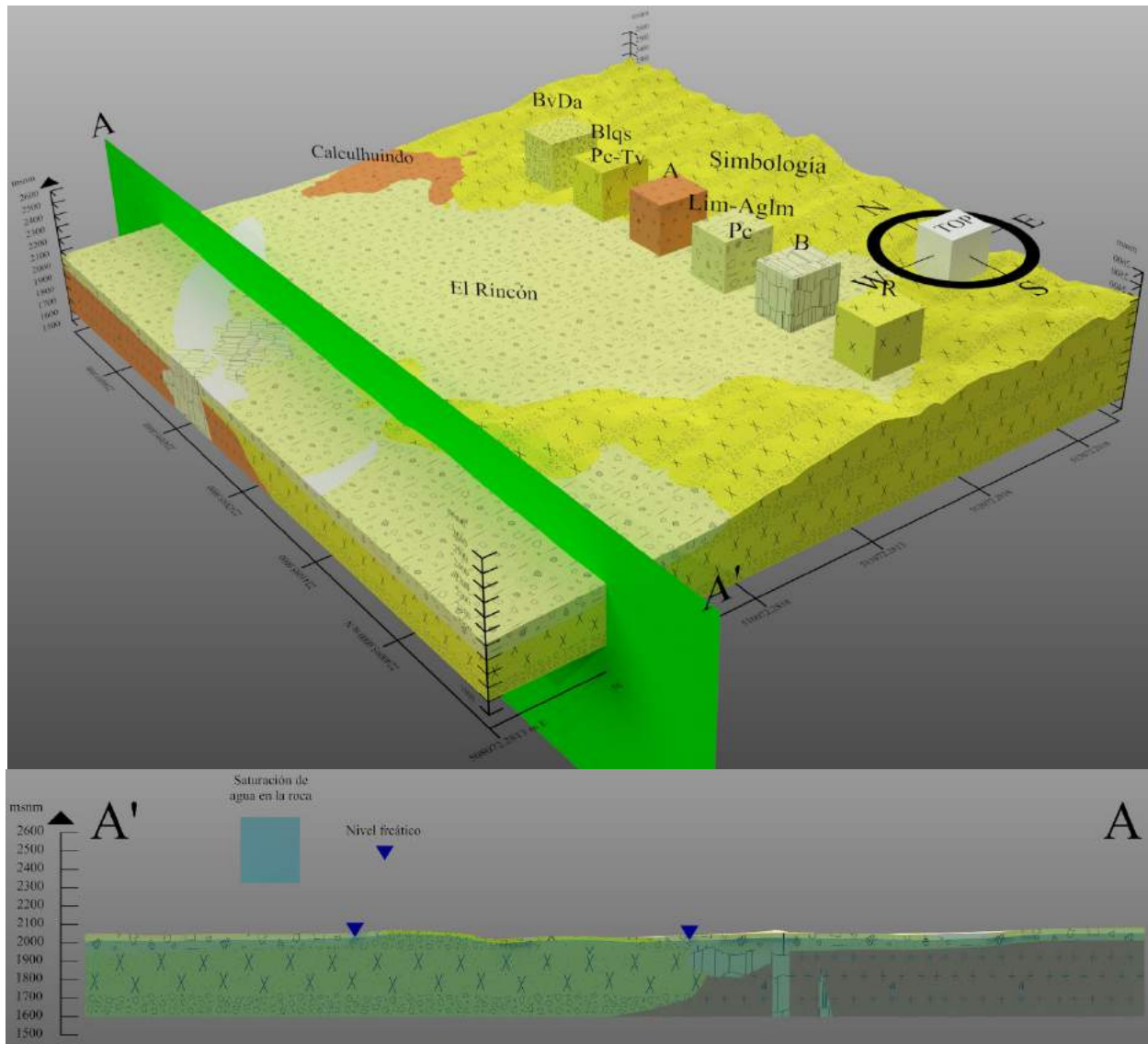


Figura VI-7. Imagen renderizada de corte de modelo conceptual hidrogeológico 3D en vista lateral derecha, representando la litología y el nivel freático del agua de 30 a 50m de profundidad respecto a la superficie en esta zona, varía dependiendo si se expone en las zonas altas; el nivel varía de 5 a 20m de profundidad desde la superficie del relieve. Elaboración propia.

La capa representada en la Fig. VI-7 de la Formación Tarango (Lim-Aglm Pc) está compuesta por estratos de limolita pobremente cementada con una espesor total que varía de 40 a 80 m y otra capa de aglomerado piroclástico que varía de 40 a 30 m de espesor, toda la formación tiene un volumen total de 1,073,731,404.2309 m<sup>3</sup> de la caja roca en el modelo conceptual hidrogeológico.

Es posible saber la cuantificación del volumen poroso de la roca del agua subterránea en movimiento de la zona dentro de la caja roca teóricamente, relacionando una porosidad sugerida de las rocas con los siguientes factores:

- Espesor de la Fm. Tarango en la caja roca es de 100 m, lo que equivale al 100 % del volumen rocoso ( $V_{RT}$ ), que es de 1,073,731,404.2309 m<sup>3</sup>.

De la Fm. Tarango se divide en aglomerado y limolita:

- Espesor promedio de la limolita es de 65 m, lo que equivale al 65% del  $V_R$ .
- Espesor promedio del aglomerado piroclástico es de 35 m, del 35 % del  $V_R$ .
- Porosidad sugerida para limolitas 3% y para el aglomerado 16 %.

Si la profundidad promedio del nivel freático donde se encuentra la Fm. Tarango es de 40 m de profundidad, por lo tanto, sólo tendrá 60 m de espesor donde se encuentre la saturación de agua en la roca casi impermeable; 1) Para la limolita de 25 m (espesor) y para el aglomerado en la roca semipermeable de 35 m (espesor).

Entonces para la limolita se tendrá un volumen poroso en la roca de 8,052,958.533 m<sup>3</sup>, mientras que el aglomerado será de 60,128,958.64 m<sup>3</sup>, de la cual pertenece a la Microcuenca Arroyo El Toril-La Mora (10,028,390.8450 m<sup>3</sup> promedio anual de agua infiltrada) y una pequeña parte del El Arenal (7120459.2290 m<sup>3</sup> promedio anual de agua infiltrada). Se necesitarían más estudios de registros geofísicos y de gabinete para obtener la cuantificación del agua en movimiento de la caja roca presentada en la Figura VI-7 .

## Conclusiones

- Es de suma importancia conocer la interacción del agua en el subsuelo, así como en la superficie terrestre, su distribución, el movimiento, la intervención a manera de un agente geológico y sus efectos. Se expresa que los conceptos como acuífugo, acuitardo y acuicludo no representan una buena comprensión del agua subterránea, porque no se delimita el agua por formaciones rocosas con muy baja permeabilidad (lutitas) cómo se ha pensado, sino que es parte de las rocas y se integra como un sistema cíclico.
- El movimiento del agua subterránea es dado por medio de un gran sistema de flujos que permite su desplazamiento a través de las formaciones rocosas y guiado por las disposiciones estructurales de éstas.
- Es imprescindible tener un estudio hidrogeológico antes de efectuar cualquier aplicación para el uso de este recurso natural (agua), y necesariamente al mismo tiempo su manejo, gestión y protección.
- La clasificación del agua subterránea cómo flujos regionales y locales es de gran importancia, porque pueden indicar la cantidad de sales solubles que puede presentar en cierto lugar geográficamente, así como en su profundidad, esta clasificación de flujo se puede mejorar con más estudios de perforaciones, geofísica e hidrogeoquímica, utilizando esta jerarquía para la consideración en la extracción y uso del agua.
- Los modelos nos indican cómo funciona el agua a través de las rocas, tomándola como un todo o sistema, y haciendo un análisis se puede concretar perforaciones de pozos de agua para su aplicación, teniendo en cuenta una distancia apropiada a



la zona de recarga. Además, es de gran relevancia conocer que la recarga de agua en la cuenca es variable al clima y a cualquier causa-efecto en relación con ella.

No siempre se tendrá la misma cantidad de agua anualmente, interrelacionado con los factores antropogénicos, climatológicos y series de diversos procesos que conllevan a su uso tanto para la sociedad como el medio ambiente.

- Los cálculos propuestos en el modelo conceptual hidrogeológico 3D son variables con respecto a la porosidad y permeabilidad de las rocas, ya que se dedujeron como un ejemplo. No obstante, el modelo se elaboró con la mayor realidad posible para observar la distribución espacial de las formaciones rocosas, por tanto, se puede modificar con más datos de geofísica y hacer un cálculo más favorable. Sin embargo, se alude que es cercano a la realidad, ya que nunca será preciso ni exacto en éstas grandes magnitudes del relieve terrestre.

## **Recomendaciones**

Se sugiere tomar en cuenta toda la información del presente documento, para realizar la aplicación hidrogeológica y se perforen más pozos de agua dentro del área de estudio, para su extracción en reserva para las épocas de estiaje. Existe suficiente agua subterránea para la población en el municipio de Actopan, Hidalgo, por lo que, a la sociedad le servirá de utilidad y no obtendrán problemas por falta del recurso hídrico, abasteciendo favorablemente el agua a los habitantes, y fabricar un plan a corto y largo plazo para la gestión y manejo de los pozos de reserva de agua.



## Bibliografía

- Alegret, L., & Thomas, E. (2001). Upper Cretaceous and lower Paleogene benthic foraminifera from northeastern Mexico. *Micropaleontology*, *XLVII*(4), 269-316. Obtenido de [https://www.jstor.org/stable/1486031?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/1486031?seq=1#page_scan_tab_contents)
- Amezcuca, N. (17 de enero de 2006). *Huizachal, Formación... Triásico Superior (Nórico)-Jurásico Inferior (Hettangiano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Huizachal.pdf>
- Aparicio Mijares, F. J. (2018). *Fundamentos de hidrología de superficie*. (G. N. Editores, Ed.) Ciudad de México, Ciudad de México, México: Limusa.
- Araujo-Mendieta, J. (1978). Litofacies y Diagénesis de la Formación Tamaulipas Inferior (Cretácico Inferior) en el subsuelo de las Areas Bejuco-La Laja, Estado de Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 14 y 15. Obtenido de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/3902/1978-39-2%20Araujo.pdf>
- Arellano Gil, J., Vachard, D., Yussim, S., & de Dios González, A. (1998). Aspectos Estratigráficos, Estructurales y paleogeográficos del Pérmico Inferior al Jurásico Inferior en Pemuxco, Estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *XV*(1), 9-13. Obtenido de <http://rmcg.geociencias.unam.mx/ojs/index.php/rmcg/article/view/1078>
- Armas Zagoya, J. M. (2004). *Cartografía geológica estructural del Valle de Huizachal, como base para el análisis de estabilidad de taludes de la carretera rumbo nuevo, Tamps., México*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares: Linares, N. L. Obtenido de [http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020149840/1020149840\\_03.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020149840/1020149840_03.pdf)
- Badillo-Cadena, L. A., & López-Palomino, I. (enero de 2012). *Formación Huayacocotla*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Huayacocotla.pdf>
- Bryan, K. (1948). Los suelos complejos y fósiles de la Altiplanicie de México en relación a los cambios climáticos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *XIII*(1), 1-20. doi:<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1948v13n1a1>
- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
- Canchari, E. (16 de enero de 2013). *Propiedades morfométricas cuenca hidrográfica con ArcGIS 10*. Obtenido de Youtube: [https://www.youtube.com/watch?v=qmldnqtV\\_Do](https://www.youtube.com/watch?v=qmldnqtV_Do)
- Cardón, H. (12 de junio de 2019). Quedan en Actopan sin agua potable, por corte de energía. *La Crónica de Hoy en Hidalgo*. Obtenido de <http://www.cronicahidalgo.com/2013/05/quedan-en-actopan-sin-agua-potable-por-corte-de-energia/>
- Carrasco-Velázquez, B. E., Martínez-Hernández, E., & Ramírez-Arriaga, E. (2009). Estratigrafía de la Formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapán, Hidalgo. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 403-417. Obtenido de [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6103/\(8\)Carrasco.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6103/(8)Carrasco.pdf)

- Carrasco-Velázquez, B. E., Morales-Puente, P., Cienfuegos, E., & Lozano-Santacruz, R. (2004). Geoquímica de las rocas asociadas al paleokarst cretácico en la Plataforma de Actopan: evolución paleohidrológica. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, XXI(3), 382-396. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1029351>
- Carrillo Bravo, J. (1961). Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al N - W de ciudad Victoria. Tamps. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 1-98. Obtenido de [http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961\\_Ene\\_Feb\\_01X.htm](http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961_Ene_Feb_01X.htm)
- Carrillo-Bravo, J. (1971). La Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 1-113. Obtenido de [http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1971/1971\\_Ene\\_Jun\\_01\\_X.htm](http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1971/1971_Ene_Jun_01_X.htm)
- CartoCrítica. (7 de agosto de 2015). *Profundidad de los pozos de agua*. Obtenido de CartoCrítica Investigación, mapas y datos para la sociedad civil: [https://cartocritica.org.mx/2015/profundidad\\_agua\\_subterranea/](https://cartocritica.org.mx/2015/profundidad_agua_subterranea/)
- Certicalia. (2019). *¿Qué es el estudio hidrogeológico?* Obtenido de Certicalia: <https://www.certicalia.com/estudio-hidrogeologico/que-es-el-estudio-hidrogeologico>
- Cervantes-Medel, A., & Armienta, M. A. (2004). Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico. *Geofísica Internacional*, XLIII(3), 477-493. Obtenido de [http://www.geofisica.unam.mx/iframes/editorial/publicaciones/investigacion/geofisica\\_internacional/anteriores/2004/03/Cervantes.pdf](http://www.geofisica.unam.mx/iframes/editorial/publicaciones/investigacion/geofisica_internacional/anteriores/2004/03/Cervantes.pdf)
- Chaverri Benavides, G. (1992). *Fundamentos de química*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Chevotarev. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, VIII(1-2), 22-32. doi:[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)
- Cimadevilla Fuente, D. (2017). *Valoración de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) para la caracterización de zonas poco profundas*. Universidad de Oviedo, Geología. Oviedo: Universidad de Oviedo. Obtenido de [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/46062/6/TFM\\_DavidCimadevilla.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/46062/6/TFM_DavidCimadevilla.pdf)
- Comte-Sponville, A. (2000). *Invitación a la Filosofía*. (V. Gómez Ibáñez, Trad.) París, Francia: Paidós. Obtenido de <https://books.google.com.mx/books?id=o4VeBQfziLoC&printsec=frontcover&dq=filosof%C3%ADa&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi8wpKbpa7nAhUE7awKHZ38CREQ6AEITjAF#v=onepage&q=filosof%C3%ADa&f=false>
- CONABIO. (2001). *Subcuencas hidrológicas*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (28 de abril de 2008). *Subcuencas hidrológicas*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- CONABIO. (enero de 2016). *Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (20 de abril de 2015). *Actualización de la Disponibilidad media anual de agua en el acuífero Actopan-Santiago de Anaya (1313), Estado de Hidalgo*. Obtenido de Gobierno de México: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103081/DR\\_1313.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103081/DR_1313.pdf)
- Dávila Pórcel, R. A., & de León Gómez, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 464 y 465. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v63n3/v63n3a8.pdf>
- De los Santos M., J. D., Barrios Rodríguez, F., Miranda Huerta, A., & Sánchez Bermeo, G. (1995). *Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/1735\\_F14-D71\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1735_F14-D71_GM.pdf)
- Díaz. (2013). *Atla de Riesgos Naturales del Municipio de Actopan, Hidalgo*. Obtenido de Secretaría de Gobernación: [http://www.anr.gob.mx/Docs/2013/13003\\_AR\\_ACTOPAN.pdf](http://www.anr.gob.mx/Docs/2013/13003_AR_ACTOPAN.pdf)
- Dumble, E. T. (1915). *Tertiary Deposits of Northeastern Mexico* (Vol. V). Texas, U.S.A.: The General Libraries University of Texas at Austin. Obtenido de <https://ia800302.us.archive.org/17/items/tertiarydeposit00dumbgoog/tertiarydeposit00dumbgoog.pdf>
- EcuRed. (2014). *Cometa Shoemaker-Levy 9*. Obtenido de EcuRed:Enciclopedia cubana: [https://www.ecured.cu/Cometa\\_Shoemaker-Levy\\_9](https://www.ecured.cu/Cometa_Shoemaker-Levy_9)
- EESA. (2017). *Copernicus Open Access Hub*. Obtenido de EESA: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 1 y 2. Obtenido de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/eguiluz.pdf>
- Enciclopedia. (2012). *Origen del agua en la Tierra*. Obtenido de enciclopedia.us: [http://enciclopedia.us.es/index.php/Origen\\_del\\_agua\\_en\\_la\\_Tierra](http://enciclopedia.us.es/index.php/Origen_del_agua_en_la_Tierra)
- EPYESA. (2017). *Geofísica Proyectos Enfocados en las Ciencias de la Tierra*. Obtenido de Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo, S.A. de C.V.: <https://epyesa.com/quienes-somos/>
- ESRI. (2017). *ArcMap Desktop*. Obtenido de ESRI: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>
- Evenick, J. C. (2008). *Introduction to Well Logs & Subsurface Maps*. Oklahoma, USA: PennWell.
- FCIHS. (23 de mayo de 2013). *Prospección Eléctrica en Corriente Continua*. Obtenido de Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea: [file:///C:/Users/brand/Desktop/20130924\\_Prospeccion\\_electrica.pdf](file:///C:/Users/brand/Desktop/20130924_Prospeccion_electrica.pdf)
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall.

- FGDC. (05 de 11 de 2016). *Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization*. Obtenido de Federal Geographic Data Committee: [https://ngmdb.usgs.gov/fgdc\\_gds/geolsymstd/download.php](https://ngmdb.usgs.gov/fgdc_gds/geolsymstd/download.php)
- Figueredo Rodríguez, J. A. (19 de marzo de 2017). *Clasificación de pendientes y sus características*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/343442912/CLASIFICACION-DE-PENDIENTES-Y-SU-CARACTERISTICAS>
- Fox, D. (21 de agosto de 2014). Antarctica's Secret Garden. *Nature*, 512, 246. Obtenido de [http://www.nature.com/polopoly\\_fs/1.15729!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/512244a.pdf](http://www.nature.com/polopoly_fs/1.15729!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/512244a.pdf)
- Gallardo de Parada, Y., & Moreno Garzón, A. (1999). *Modulo 3. Recolección de la Información*. Santa Fé, Bogotá: ICFES La Educación Superior. Obtenido de <http://www.unilibrebaq.edu.co/unilibrebaq/Ciul/documentos/MODULOS/mod3recoleccioninform.pdf>
- Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderon, A., Sainz, M. G., . . . Escolero, O. (1999). The effects of Wastewater Irrigation on Groundwater Quality in Mexico. *WOI. Sci. Tech*, XL(2), 45-52. doi:[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00429-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00429-1)
- García, E. (9 de enero de 2008). *Climas. Catálogo de Metadatos Geográficos*. Obtenido de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Garduño, H., Foster, S., Nanni, M., Kemper, K., Tuinhof, A., & Koundouri, P. (2006). *El agua subterránea en la planificación hídrica nacional y de cuencas*. Obtenido de Global Water Partnership: <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/groundwater-dimensions-of-national-water-resource-and-river-basin-planning-gw-mate-2006-spanish.pdf>
- Geoinnova. (2016). *Cómo georreferenciar imágenes en ArcMap*. Obtenido de Geoinnova Formación SIG y Medio Ambiente: [https://geoinnova.org/cursos/como-georreferenciar-imagenes-en-arcmap/?gclid=EAIaIQobChMI89qzjqetlQIV2A-BCh1AsQYwEAAYASAAEgIQhfD\\_BwE](https://geoinnova.org/cursos/como-georreferenciar-imagenes-en-arcmap/?gclid=EAIaIQobChMI89qzjqetlQIV2A-BCh1AsQYwEAAYASAAEgIQhfD_BwE)
- Geotem. (2019). *Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo*. Obtenido de Geotem Ingeniería S.A. de C.V.: <http://www.geotem.com.mx/electromg4.php>
- Geyne, R. A., Fries, C., & Probert, A. (1963). *Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México*. Pachuca, Hidalgo, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables.
- GOB HG. (2002). *Actopan*. Obtenido de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Hidalgo: <http://intranet.e-hidalgo.gob.mx/enciclomuni/municipios/13003a.htm>
- GOB HG. (2006). *Programa Municipal de Desarrollo Urbano en Actopan*. Obtenido de Hidalgo. Instituto de Vivienda, Desarrollo Urbano y Asentamientos Humanos: <http://actopan Hidalgo.gob.mx/wp-content/uploads/2018/05/DES-3-Plan-de-Desarrollo-Urbano.pdf>

- GOB HG. (19 de noviembre de 2009). *Hidalgo Gobierno del Estado. Actopan*. Obtenido de Hidalgo Bicentenario:  
<http://bicentenario.hidalgo.gob.mx/descargables/monografia/Actopan.pdf>
- Gómez Escobar, M. d. (2004). *Métodos y técnicas de la cartografía temática*. Obtenido de Universidad Autónoma de México:  
[http://www.igg.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/temas\\_sele/metod\\_y\\_tecn.pdf](http://www.igg.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/temas_sele/metod_y_tecn.pdf)
- Gómez Tuena, A., Orozco Esquivel, M. T., & Luca Ferrari. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 228-230.
- González, A. M. (2013). *Adaptaciones*. Obtenido de Hipertextos del área de biología:  
[http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema3/tema3\\_3xerofita.htm](http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema3/tema3_3xerofita.htm)
- González-Rodríguez, K. A., Cuevas-Cardona, C., & Castillo Cerón, J. M. (2009). *Los fósiles del estado de Hidalgo*. Pachuca: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Griem, W. (2018). *Apuntes Geología General: Las rocas ígneas. Introducción: El magma y las rocas ígneas*. Obtenido de Geología General:  
<https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap04.htm>
- Hernández Gutiérrez, L. E., Santamarta, J. C., Tomás, R., Cano, M., García Barba, J., & Piñero García, A. (2013). *Preparación de láminas delgadas de rocas*. Obtenido de Prácticas de Ingeniería del Terreno. Universidades de Alicante y de La Laguna:  
<https://campusvirtual.ull.es/ocw/mod/resource/view.php?id=5703>
- Hispagua. (2019). *Hidrogeología*. Obtenido de Hispagua. Sistema Español de Información sobre el Agua: <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrogeologia>
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of American Bulletin*, 56, 281.
- Huizar-Álvarez, R., Campos-Enríquez, C. O., Lermo-Samaniego, J., Delgado-Rodríguez, O., & Huidobro-González, A. (1997). Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basins of Apan. *Geofísica Internacional*, XXXVI(4), 217-233. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/26493751\\_Geophysical\\_and\\_hydrogeological\\_characterization\\_of\\_the\\_sub-basins\\_of\\_Apan\\_and\\_Tochar\\_Mexico\\_basin](https://www.researchgate.net/publication/26493751_Geophysical_and_hydrogeological_characterization_of_the_sub-basins_of_Apan_and_Tochar_Mexico_basin)
- IAEA. (6 de marzo de 2003). *Aspectos geohidráulicos*. Obtenido de International Atomic Energy Agency:  
<file:///C:/Users/brand/Desktop/aSPECTOS%20GEOHIDRÁULICOS.pdf>
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2010). *Métodos para la determinación para el tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*. Universidad Politécnica de Valencia, Producción Vegetal. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo%20de%20concentración.pdf>
- IDAEM. (2014). *Modelos hidrogeológicos conceptuales*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>



- Ifrim, C., Stinnesbeck, W., & Schafhauser, A. (2005). Maastrichtian shallow-water ammonites of northeastern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, XXII(1), 51. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/572/57222106.pdf>
- Imlay, R. W., Cepeda, E., Álvarez, M., & Díaz, T. (1948). Stratigraphic Relation of Certain Jurassic Formations in Eastern Mexico. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologist*, XXXII(9), 1750-1761. Obtenido de <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1944-48/data/pg/0032/0009/1750/1750.htm>
- Inafed. (s.f.). *Hidalgo*. Obtenido de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM13hidalgo/regionalizacion.html>
- INEGI. (1984). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas superficiales. Escala 1:250 000. Serie I. Pachuca*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/default.html#Descargas>
- INEGI. (mayo de 2004). *Fisiografía*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/fisiografia/infoescala.aspx>
- INEGI. (2010). *Hidrografía*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/default.html#Descargas>
- INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. F14D71 (Actopan)*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825271060>
- INEGI. (2015). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. F14D81 (Pachuca)*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825271077>
- INEGI. (2018). *Marco Geoestadístico*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463526636>
- INEGI. (s.f.). *Mapas*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas/>
- INEGI y GOBHG. (2004). *Hidalgo Hoy*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía y Gobierno del Estado de Hidalgo: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825169923/702825169923\\_4.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825169923/702825169923_4.pdf)
- INIFAP. (6 de marzo de 2008). *Edafología. Catálogo de Metadatos Geográficos*. Obtenido de CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Insugeo. (s.f.). *Capítulo 2: Clasificación y nomenclatura de las rocas ígneas*. Obtenido de Insugeo: [http://www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_18/02.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_18/02.htm)
- Islas García, J., Viveros Vargas, N., Navarro Gómez, H. I., Escobar Villagrán, B. S., Guerrero Rodríguez, M., Arrazola Hernández, E., & Carrillo García, M. (30 de noviembre de 2017). *Análisis, Observación y Actualización del Modelo Conceptual del Acuífero 1313 Actopan-Santiago de Anaya, Hidalgo*. Obtenido de III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII: <http://comeii.com/comeii2017/assets/documentos/ponencias/extenso/COMEII-17057.pdf>



- Juárez-Arriaga, E., & López-Palomino, I. (mayo de 2009). *El Morro, fanglomerado...Paleógeno, Eoceno Medio?-Oligoceno Temprano*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/EIMorro.pdf>
- Kresic, N. (2006). *Hidrogeology and Groundwater Modeling*. New York: CRC Press Taylor and Francis Group.
- Lawlor, P. J., Ortega Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Ochoa Camarillo, H., Lopez, R., & Sampson, D. E. (1999). U-Pb geochronology, geochemistry, and provenance of the Grenvillian Huiznopala Gneiss of Eastern Mexico. *ELSEVIER Precambrian Research*, 73-99. doi:[https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00108-9)
- Lemus V., M., & Navarro V., G. (marzo de 2003). *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*. Obtenido de Oasificación: <http://www.oasification.com/archivos/Manual%20de%20Mauco.pdf>
- Lenntech. (2020). *Origen y situación de las agua subterránea en la tierra*. Obtenido de Lenntech BV: <https://www.lenntech.es/agua-subterranea/origen-y-cantidad-agua-subterranea.htm>
- Lohman, S. W. (1988). *Definitions of Selected Ground-Water Terms-Revisions and Conceptual Refinements*. Obtenido de United States Geological Survey: [https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp\\_1988/pdf/wsp\\_1988.pdf](https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1988/pdf/wsp_1988.pdf)
- López Ojeda, J. A. (30 de mayo de 2017). *Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000>
- López-Palomino, I., & Juárez-Arriaga, E. (julio de 2008). *Santiago, Formación...Jurásico Medio (Calloviano)-Jurásico Tardío (Oxfordiano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Santiago.pdf>
- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (agosto de 2007a). *Cahuasas, Formación...Jurásico Medio, Aaleniano-Bathoniano*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Cahuasas.pdf>
- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (abril de 2007b). *Pimienta, Formación...Jurásico Tardío (Tithoniano)-Cretácico*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Pimienta.pdf>
- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (agosto de 2007c). *Chipoco, Formación...Jurásico Tardío, Kimmeridgiano-Tithoniano*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Chipoco.pdf>
- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (marzo de 2007d). *Tamabra, formación...Cretácico Temprano (Albiano temprano)-Cretácico Tardío (Turoniano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://es.scribd.com/document/294588094/Formacion-Tamabra-SGM>
- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (junio de 2007e). *Soyatal, formación...Cretácico Tardío (Turoniano-Campaniano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Soyatal.pdf>

- López-Palomino, I., & Piña-Arce, M. (junio de 2009). *El Abra, Formación...Cretácico Temprano (Albiano)-Cretácico Tardío (Santoniano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://es.scribd.com/document/294588056/ElAbra-pdf>
- López-Palomino, I., & Ramírez-Garza, B. M. (agosto de 2008). *Tamán, Formación...Jurásico Tardío (Kimmeridgiano-Tithoniano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Taman.pdf>
- López-Ramos, E. (1979). *Geología de México* (Vol. II). Ciudad de México, México: Trillas.
- Luca Ferrari. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 85. Obtenido de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/ferrari.pdf>
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2012). *Essentials of geology* (Eleventh ed.). New Jersey, United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Lux Cardona, B. (2016). *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas*. Obtenido de Repositorio del Sistema Bibliotecario. Universidad de San Carlos Guatemala: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20básicos%20de%20Morfometría%20de%20Cuencas%20Hidrográficas.pdf>
- Maliva, R. G. (2016). *Aquifer Characterization Techniques Schlumberger Method in Water Resources Evaluation Series No. 4*. Switzerland: Springer.
- Mateos M., A. (1966). *Compendio de Etimologías Grecolatinas del Español*. Colima, México: Esfinge, S. A.
- Mendoza Espinoza, M., Ramírez Cardona, M., Cerecedo S., E., Cruz Martínez, A., Zamorano Téllez, J. A., & Meneses Lugo, J. A. (2009). Revista de avances en la investigación científica de metalurgia extractiva, materiales y geología del CIMMMYSH A.C. *Colegio de Ingenieros mineros, metalúrgicos de materiales y similares del Estado de Hidalgo A.C.*, 1-26. Obtenido de <https://www.virtualpro.co/biblioteca/revista-de-avances-en-la-investigacion-cientifica-de-metalurgia-extractiva-materiales-y-geologia-del-colegio-de-ingenieros-mineros-metalurgicos-de-materiales-y-similares-del-estado-de-hidalgo-mexico-cimmmysh>
- Mendoza Romero, G. (2016). *Apuntes de Principios de la Petrofísica*. IPN ESIA TICOMAN, Ciencias de la Tierra. CDMX: IPN ESIA TICOMAN Dep. de Geología.
- Mendoza Rosales, C. C. (1990). *Estructura del sector Xajha (Cabalgadura El Doctor) estados de Hidalgo y Querétaro*. Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. CDMX: UNAM. Obtenido de <http://132.248.9.195/pmig2017/0120609/Index.html>
- Méxicodesconocido. (31 de julio de 2018). *16 montañas que debes conocer en México*. Obtenido de Méxicodesconocido: <https://www.mexicodesconocido.com.mx/montanas-que-debes-conocer-en-mexico.html>
- Mixon, R. B., Murray, G. E., & Díaz G., T. (1959). Age and Correlation of Huizachal Group (Mesozoic) State of Tamaulipas, Mexico. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologist*, XLIII(4), 757-771. doi:<http://doi.org/10.1306/0BDA5CE1-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- Montanari, A. (s.f.). *Sustainable management of water resources*. Obtenido de Alma Mater Studiorum Università di Bologna: <http://distart119.ing.unibo.it/albertonew/?q=node/128>

- NGO. (1996-2018). *Aquífer*. Obtenido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/aquifer/>
- Nonner, J. C. (2003). *Introduction to Hydrogeology*. Abingdon: A.A. Balkema Publishers.
- Ochoa-Camarillo, H., Buitrón-Sánchez, B. E., & Silva-Pineda, A. (1999). Redbeds of the Huayacocotla anticlinorium, state of Hidalgo, east-central Mexico. En C. Bartolini, J. L. Wilson, & T. F. Lawton, *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico* (págs. 59-68). Colorado: Special Paper 340. doi:<https://doi.org/10.1130/0-8137-2340-X.59>
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Balance hídrico superficial*. Obtenido de Global Water Partnership: [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf)
- Palma Ramírez, A. (octubre de 2015). *Formación Guacamaya*. Obtenido de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/282862510\\_Formacion\\_Guacamaya](https://www.researchgate.net/publication/282862510_Formacion_Guacamaya)
- Palmer, R. H. (1927). Geology of Eastern Hidalgo and Adjacent Parts of Veracruz, Mexico. *American Association of Petroleum Geologist*, 1188-1190. Obtenido de <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/11/11/1173/31375/geology-of-eastern-hidalgo-and-adjacent-parts-of?redirectedFrom=fulltext>
- Pedroza González, E. (2018). *Hidráulica básica, historia, conceptos y ecuaciones*. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/hidraulica/Libro-hidraulica-basica.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/hidraulica/Libro-hidraulica-basica.pdf)
- Pellé, J. M. (enero de 2012). *RGB Color Code according to the Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Paris, France*. Obtenido de Purdue University College of Engineering: <https://engineering.purdue.edu/Stratigraphy/charts/RGB.pdf>
- Pérez Moreno, F., Prieto García, F., Rojas Hernández, A., Galán Vidal, C. A., Marmolejo Santillán, Y., Romo Gómez, C., . . . Barrado Esteban, E. (2003). Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Hidrobiología*, XIII(2), 95-102. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v13n2/v13n2a1.pdf>
- Piña-Arce, M., & López-Palomino, I. (junio de 2007a). *Las Trancas, Formación...Jurásico Tardío (Kimmeridgiano-Tithoniano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/LasTrancas.pdf>
- Piña-Arce, M., & López-Palomino, I. (junio de 2007b). *El Doctor, Caliza...Cretácico Temprano, Albiano- Cretácico Tardío, Cenomaniano*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/ElDoctor.pdf>
- Piña-Arce, M., & López-Palomino, I. (Abril de 2007c). *Méndez, Formación...Cretácico Tardío (Campaniano-Maastrichtiano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Mendez.pdf>
- Piñero Ramírez, F. (noviembre de 2011). *Inventario Físico de los Recursos Minerales de la Carta Actopan F14-D*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1310PIRF00\\_01\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1310PIRF00_01_01.PDF)

- Piñeiro Ramírez, F. (noviembre de 2011). *Inventario físico de los recursos minerales de la carta Actopan F14-D71*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1310PIRF00\\_01\\_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T1310PIRF00_01_01.PDF)
- Puerta Tuesta, R., Rengifo Trigozo, J., & Bravo Morales, N. F. (2013). *Manual de ArcGIS 10 Nivel Intermedio*. Tingo María, Perú: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Pulido Bosch, A. (2014). *Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos*. Almeria: Universidad de Almeria.
- RAE. (2019). *Caracterizar*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=caracterizar>
- Ramírez Tello, E., Zárate López, J., & García Ortiz, M. (2009). *Carta Geológico-Minero Mixquiahuala F14-C89 Esc: 1:50,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/1696\\_F14-C89\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1696_F14-C89_GM.pdf)
- Ramírez-Garza, B. M., López-Palomino, I., & Zamudio-Ángeles, D. (julio de 2008). *Mexcala, Formación...Cretácico Tardío (Cenomaniano-Maastrichtiano)*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Mexcala.pdf>
- Remigio-Morales, K. (noviembre de 2013). *Formación: Tamaulipas Superior. Cretácico Temprano-Cretácico Tardío: Albiano-Cenomaniano*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/TamaulipasSuperior.pdf>
- Reyes Trujillo, A., Ulises Barroso, F., & Carbajal Escobar, Y. (2014). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Richardson D.D., W. (december de 1804). On The Volcanic Theory. *Royal Irish Academy, X*, 35-108. Obtenido de [https://www.jstor.org/stable/30078961?seq=1#metadata\\_info\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/30078961?seq=1#metadata_info_tab_contents)
- Rodríguez Ruiz, P. (2011). *Calculo de población y período de diseño. Sistema de agua potable*. Obtenido de Civilgeeks. Ingeniería y construcción: <https://civilgeeks.com/2010/10/07/calculo-de-poblacion-y-periodo-de-diseno-sistema-de-agua-potable/>
- Rodríguez Ruíz, P. (2012). *Dotación en sistema de agua potable*. Obtenido de Civilgeeks. Ingeniería y construcción: <https://civilgeeks.com/2010/10/07/dotacion-sistema-de-agua-potable/>
- Rodríguez, J. A. (2016). *La Porosidad como componente petrográfico: La porosidad de las rocas carbonatadas*. Universidad de Oviedo, Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica). La Nueva España: Universidad de Oviedo. Obtenido de [http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4886/mod\\_resource/content/1/T3a-PetrografiaPorosidad.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4886/mod_resource/content/1/T3a-PetrografiaPorosidad.pdf)
- Rueda Gaxiola, J. (30 de enero de 2014). Resumen del Agua. *Apuntes de Geología Física II*. CDMX: IPN ESIA TICOMÁN "Ciencias de la Tierra".
- Rueda Gaxiola, J. (2017). Mapa de alineamientos. *Apuntes de Geología de México*. CDMX, México: IPN ESIA TICOMÁN.

- Rueda Gaxiola, J., Dueñas, M. A., Rodríguez, J. L., Minero, M., & Uribe, G. (1993). Los Anticlinorios de Huizachal-Peregrina y de Huayacocotla: Dos Partes de la Fosa de Huayacocotla-El Alamar. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XLIII(2), 1-29. Obtenido de [http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1993/1993\\_Ene\\_Jun\\_01\\_X.html](http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1993/1993_Ene_Jun_01_X.html)
- Sánchez Rojas, L. E., Arredondo Mendoza, J., & Cardoso Vázquez, E. (2007). *Carta Geológico-Minera Pachuca F14-D81 Hidalgo y Estado de México, Escala 1: 50,000*. Pachuca: Servicio Geológico Mexicano.
- Sánchez San Román, F. J. (2012). *Hidrología superficial (III) Relación Precipitación-Escorrentía*. Obtenido de Open Course Ware. Universidad de Salamanca: [http://hidrologia.usal.es/temas/Hid\\_Sup\\_3.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_Sup_3.pdf)
- Sánchez San Roman, F. J. (2017). *Ley de Darcy. Conductividad Hidráulica*. Obtenido de Universidad de Salamanca: [http://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf)
- Schlumberger. (2017). *Hydraulic Head*. Obtenido de Schlumberger: [http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/h/hydraulic\\_head.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/h/hydraulic_head.aspx)
- SEDESOL. (2010). *Catálogo de localidades. Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP*. Obtenido de Secretaría de Desarrollo Social: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?ent=13&mun=003>
- Segerstrom, K. (1961). Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y del noreste del Estado de México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 149 y 150. Obtenido de [http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961\\_Mzo\\_Abr\\_04X.htm](http://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961_Mzo_Abr_04X.htm)
- Segerstrom, K. (1962). Geology of South-central Hidalgo and North-eastern México, Mexico. *Geological Survey Bulletin 1104-C*, 97-99. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/bul/1104c/report.pdf>
- SEGOB. (7 de julio de 2016). *Secretaría de Gobernación. Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de Secretaría de Gobernación: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5443856&fecha=07/07/2016](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5443856&fecha=07/07/2016)
- Sellers, C., Buján, S., Corbelle, E., & Miranda, D. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador. *Universidad de Azuay*, 399-412.
- SGM. (1995 y 2007). *Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas\\_Ed50.jsp](http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp)
- SGM. (1997). *Carta Geológico-Minera Pachuca F14-11 Escala 1:250,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/88\\_F14-11\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/88_F14-11_GM.pdf)
- SGM. (1999). *Carta Geológico-Minera Ciudad Valles F14-8 Escala 1:250,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/87\\_F14-8\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/87_F14-8_GM.pdf)



- SGM. (2002). *Carta Geológico-Minera Ciudad de México E14-2 Escala 1:250,000*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/89\\_E14-2\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/89_E14-2_GM.pdf)
- SGM. (2016). *¿Qué es la hidrogeología?* Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachmentment/file/157801/Que-es-la-Hidrogeologia.pdf
- SGM. (22 de marzo de 2017). *Geofísica*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geofisica/Introduccion-geofisica.html>
- SIATL. (2019). *Actopan, Hidalgo*. Obtenido de Sistema de flujos de agua de cuencas hidrográficas: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#app=86ae&4b36-selectedIndex=0&6fa8-selectedIndex=0](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#app=86ae&4b36-selectedIndex=0&6fa8-selectedIndex=0)
- Simons, F. S., & Mapes V., E. (1956). *Geology and Ore Deposits of the Zimapan Mining District, State of Hidalgo Mexico*. Washington: Geological Survey Professional Paper 284. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov/pp/0284/report.pdf>
- SMN. (2015). *Normales Climatológicas*. Obtenido de Servicio Meteorológico Nacional: <http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL13060.TXT>
- SNIM. (s.f.). *Sistema Nacional de Información Municipal. Descarga de Base de Datos*. . Obtenido de Secretaría de Gobernación: <http://www.snim.rami.gob.mx/index2.html>
- Strahler, A. N. (diciembre de 1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union*, 913-920. doi:<https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Suter, M., López Martínez, M., Quintero Legorreta, O., & Carrillo Martínez, M. (2001). Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Bulletin of Geological Society of America*, *CXIII*(6), 693-703. doi:[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<0693:QIAEIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<0693:QIAEIT>2.0.CO;2)
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (Second Edition ed.). The Edinburgh Building, UK: Cambridge University Press.
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, *VII*, 1-14. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/226390675\\_Groundwater\\_as\\_a\\_geologic\\_agent\\_An\\_overview\\_of\\_the\\_causes\\_processes\\_and\\_manifestations](https://www.researchgate.net/publication/226390675_Groundwater_as_a_geologic_agent_An_overview_of_the_causes_processes_and_manifestations)
- Trujillo Candelaria, J. A. (1977). Posibilidades acuíferas en sedimentos continentales terciarios de la República Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *XXXVIII*(2), 34-51. doi:<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1977v38n2a4>
- UAF. (21 de 12 de 2010). *Vertex is the Alaska Satellite Facility's data portal for remotely sensed imagery of the Earth*. Obtenido de Alaska Satellite Facility: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>
- UJCV. (20 de mayo de 2011). *Cuenca hidrográfica y cuenca hidrológica*. Obtenido de Hidrología UJCV Universidad José Cecilio del Valle : <https://hidrologiaujcv.wordpress.com/2011/05/20/cuenca-hidrografica/>
- USGS. (2 de diciembre de 2016). *El ciclo del agua: The water cycle*. Obtenido de United States Geological Survey: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

- Velarde, F. G.-A. (2012). *Restauración del paisaje*. Madrid, España: Paraninfo. Obtenido de [https://books.google.es/books?id=Ln9G8XISUt8C&pg=PA61&dq=cuenca+hidrogr%C3%A1fica++cuenca+hidrol%C3%B3gica+acu%C3%ADferos&hl=es&sa=X&ved=0ahUK Ewi09fHMuqjZAhVEshQKHfacDOkQ6AEIPjAE#v=onepage&q=cuenca%20hidrogr%C3%A1fica%20%20cuenca%20hidrol%C3%B3gica%20acu%](https://books.google.es/books?id=Ln9G8XISUt8C&pg=PA61&dq=cuenca+hidrogr%C3%A1fica++cuenca+hidrol%C3%B3gica+acu%C3%ADferos&hl=es&sa=X&ved=0ahUK Ewi09fHMuqjZAhVEshQKHfacDOkQ6AEIPjAE#v=onepage&q=cuenca%20hidrogr%C3%A1fica%20%20cuenca%20hidrol%C3%B3gica%20acu%20)
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2010). Estimación de tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, LXXVIII(165), 58-71. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138>
- Verde Ramírez, M. d. (2009). *Estratigrafía y Facies de la Formación Xaltipa, Región de Huayacocotla, Veracruz*. UNAM, Departamento de Geología. CDMX: UNAM. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1168>
- Vich, A. (1996). *Representación esquemática del ciclo del agua a nivel cuenca hídrica*. Obtenido de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/figure/2-Representacion-esquematica-del-ciclo-del-agua-a-nivel-de-cuenca-hidrica\\_fig1\\_305937814](https://www.researchgate.net/figure/2-Representacion-esquematica-del-ciclo-del-agua-a-nivel-de-cuenca-hidrica_fig1_305937814)
- Villaseñor-Cabral, M., Gómez-Caballero, J., Condliffe, E., & Medina de la Paz, J. (2000). Origen de la Zonación en Granates de la Chimenea las Ánimas, Zimapán, Hidalgo. *Unión Geofísica Mexicana (GEOS)*, XX(2), 90-91. Obtenido de [file:///C:/Users/brand\\_pfdks/Downloads/Villasenor-Cabral00-2.pdf](file:///C:/Users/brand_pfdks/Downloads/Villasenor-Cabral00-2.pdf)
- Wiki. (30 de julio de 2017). *Actopan (Hidalgo)*. Obtenido de Wikipedia La enclopedia libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Actopan\\_\(Hidalgo\)#cite\\_note-76](https://es.wikipedia.org/wiki/Actopan_(Hidalgo)#cite_note-76)
- Wikipedia. (2019). *Agua de mar*. Obtenido de Wikipedia la enciclopedia libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Agua\\_de\\_mar](https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_de_mar)
- Wikipedia. (20 de enero de 2020). *Gradiente geotérmico*. Obtenido de Wikipedia la enciclopedia libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Gradiente\\_geotérmico](https://es.wikipedia.org/wiki/Gradiente_geotérmico)
- Wilson, B. W., Hernández M., J. P., & Meave T., E. (1955). Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1-10. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1955v18n1a1>
- Woolfson, M. (2000). The origin and evolution of the solar system. *Astronomy & Geophysics*, XLI(1), 1.12–1.19. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2000.00012.x>

### Bibliografía recomendada

- Nonner, J. C. (2003). *Introduction to Hydrogeology*. Abingdon: A.A. Balkema Publishers. Recuperado el 13 de septiembre de 2017
- Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and Groundwater Modeling*. New York: CRC Press Taylor and Francis Group.
- Muñoz Razo, C. (2015). *Cómo Elaborar y Asesorar una Investigación de Tesis*. Ciudad de México, México: Pearson Education.

## Anexos

Tabla A-0-1. Valores de  $K_a$  (Thorntwaite, 1944; citado en Aparicio Mijares, 2018, pág. 57).

Latitud, grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Tabla A-0-2. Coeficiente de escorrentía (Benítez et al., 1980; citado en Lemus V. y Navarro V., 2003)

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		> 50	20 - 50	5 - 20	1 - 5	1 - 0
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

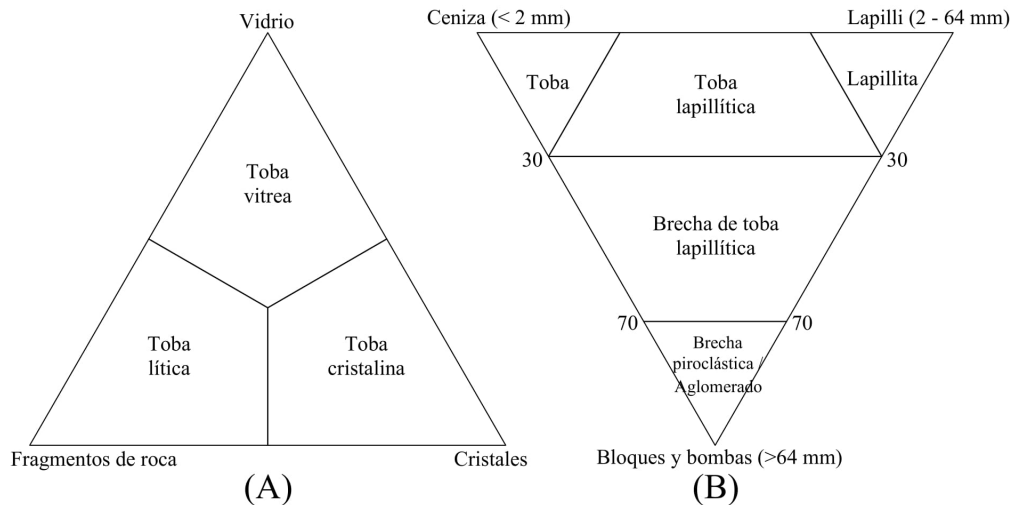


Diagrama A-1. Clasificación de rocas piroclásticas (Schmid, 1981; citado en Insugeo, s.f.)

Tabla A-0-3. Clasificación y nomenclatura de depósitos piroclásticos (Schmid, 1981, citado en Insugeo, s.f.)

Piroclasto (individuo)	Tefra (agregado inconsolidado)	Piroclastita	Tamaño [mm]
Bloque	Aglomerado piroclástico	Brecha o aglomerado piroclásticos	> 64
Bomba	Estrato de bloques o bombas		
Lapilli	Estrato o capa de lapilli	Lapillita	2 – 64
Ceniza de grano grueso	Estrato o capa de ceniza gruesa	Toba gruesa	0.062 – 2
Ceniza de grano fino	Estrato o capa de ceniza fina	Toba fina	< 0.062

Tabla A-0-4. Clasificación del flujo de agua subterránea a nivel regional con sus diferentes fases, en relación con su salinidad de agua lacustre y oceánica Modificado de Chevotarev (1955, pág. 43) agregando un dato para la república mexicana.

Término	Tipo de agua	Fases	Salinidad total [ppm]	<sup>a</sup> Salinidad total [%]	<sup>b</sup> Elevación promedio de las montañas de México [msnm]	Valores de reacción en porcentaje					
						Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> + CO <sub>2</sub>
Flutarlentos o Flutarlento	Agua de lago Alpino	-	22.90	0.01	-	15.10	31.20	3.70	9.20	8.10	32.70
	Agua con HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	I	387.40	0.24	3725 - 2980	5.30	28.70	16.00	5.40	2.80	41.80
	Agua con Cl <sup>-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	II	4842.00	2.97	2980 - 2235	47.00	1.10	1.90	13.60	0.40	36.00
	Agua con Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> o SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> -Cl <sup>-</sup>	III	4710.00	2.89	2235 - 1490	41.20	5.00	3.80	23.70	9.80	16.50
	Agua con SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	IV	8953.00	5.50	1490 - 745	25.50	13.80	10.70	5.40	37.10	7.50
	Agua con Cl <sup>-</sup>	V	162890.00	100	745 - 0	32.70	12.90	4.40	50.00	0.00	0.00
	Agua oceánica	-	35000.00	21.49	-	39.30	1.80	8.90	45.20	4.60	0.20

Marcas en superíndices: <sup>a</sup> Se tomó el 100% de la concentración salina en la salinidad del agua con cloruro.

<sup>b</sup> Se tiene la elevación promedio de los puntos en las 16 montañas más grandes de México (Méxicodesconocido, 2018) distribuido para las clases de agua.

Tabla A-0-5. Relación de las fases de agua subterránea con los parámetros principales en su clasificación de la región de Hidalgo, México. Elaboración propia.

Fases	<sup>c</sup> Recorrido [km]	<sup>d</sup> Tiempo [años]	<sup>e</sup> Profundidad aproximada [m]	<sup>f</sup> Gradiente geotérmico promedio [°C]
-	-	0.00	-	-
I	178.00	487671.23	600.00	17.39
II	142.29	389835.62	1200.00	34.77
III	106.58	292000.00	1800.00	52.16
IV	70.87	194164.38	2400.00	69.55
V	35.16	96328.77	3000.00	86.93
-	-	0.00	-	-

Marcas en superíndices: <sup>c</sup> Es el recorrido del punto más alto en Hidalgo (Cerro de las Navajas con 3212 msnm) (Inafed, s.f., párr. 30) hacia el noreste teniendo promedio en distancia de 178 km.

<sup>d</sup> Se basa sugiriendo que el agua subterránea profunda desde la parte de Hidalgo va a 0.001 m/día en relación con la distancia.

<sup>e</sup> La profundidad es estimada en base a la Fig. V-1 del flujo regional de aproximadamente 3km.

<sup>f</sup> El gradiente geotérmico es basado en las temperaturas tomadas por Pérez Moreno, et al. (2003), sin tomar en cuenta que es la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y varía mucho este gradiente, relacionadas con las profundidades de los pozos en esas localidades por el mapa dinámico (CartoCrítica, 2015).

Tabla A-0-6. Clasificación del flujo de agua subterránea local en una secuencia vertical. Elaboración propia basado en Chevotarev (1955).

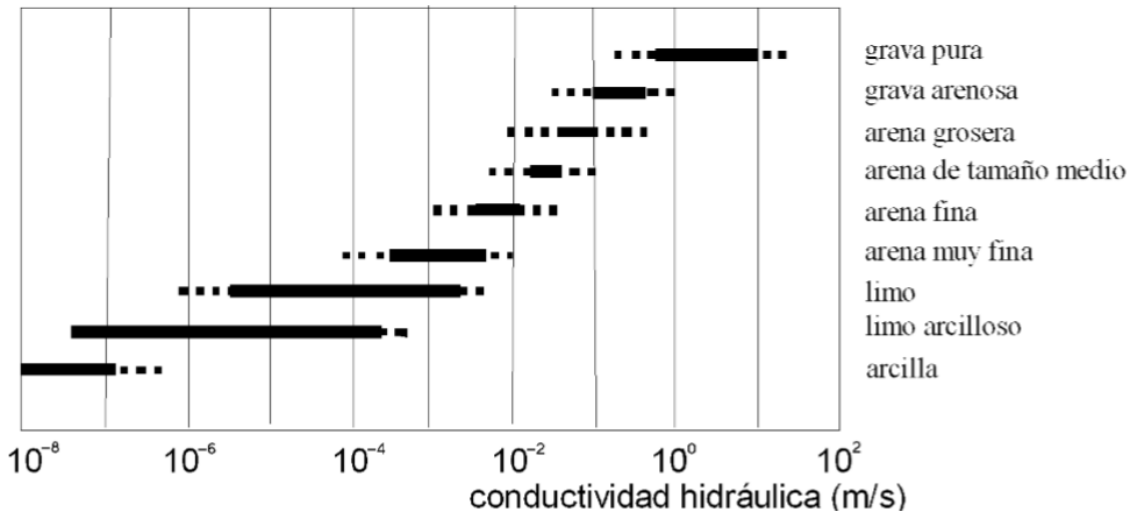
Término	Significado	Fases	Salinidad total		Grupos salinos	*Profundidad [m]	Distancia
			ppm	%			
Agua de lago Alpino			22.90	0.01			Se basa en un rango de 50 km desde el punto de recarga hacia el punto más bajo del relieve.
<i>Korifluxus</i> o <i>Koriflujo</i>	De la palabra griega κορυφή - <i>Korifi</i> <<punto más alto y elevado>>, y de la raíz del latín - <i>flu</i> de <i>fluxus</i> <<flujo>>	I	387.40	0.24	Agua con HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	0 – 40	
<i>Mesofluxus</i> o <i>Mesoflujo</i>	De la raíz griega μέσος <<mesos, medio >> y del latín - <i>flu</i> de <i>fluxus</i> <<flujo>>	II	4842.00	2.97	Agua con Cl <sup>-</sup> -HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	40 – 160	
		III	4710.00	2.89	Agua con Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> o SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> -Cl <sup>-</sup>	160 – 630	



<i>Batofluxus</i> o <i>Batoflujo</i>	De la raíz griega βάθος <<bathos, profundo>> y del latín -flu de fluxus <<flujo>>	IV	8953.00	5.50	Agua con SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	630 – 1335	
		V	162890.00	100	Agua con Cl <sup>-</sup>	1335 – 2000	
Agua oceánica			35000	21.49			

Marca en superíndice: \* El rango de profundidad fue hecho en base a un alcance logarítmico sugerido para el flujo de agua subterránea siendo (2000 m) / 3 (para 100 y 1000 m) para su división y subdivisión en la etapa más superficial, el cociente de (2000/3) / 3 para 10m.

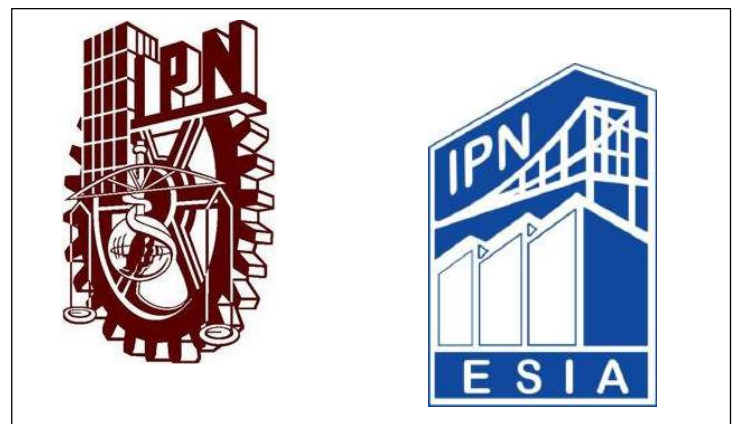
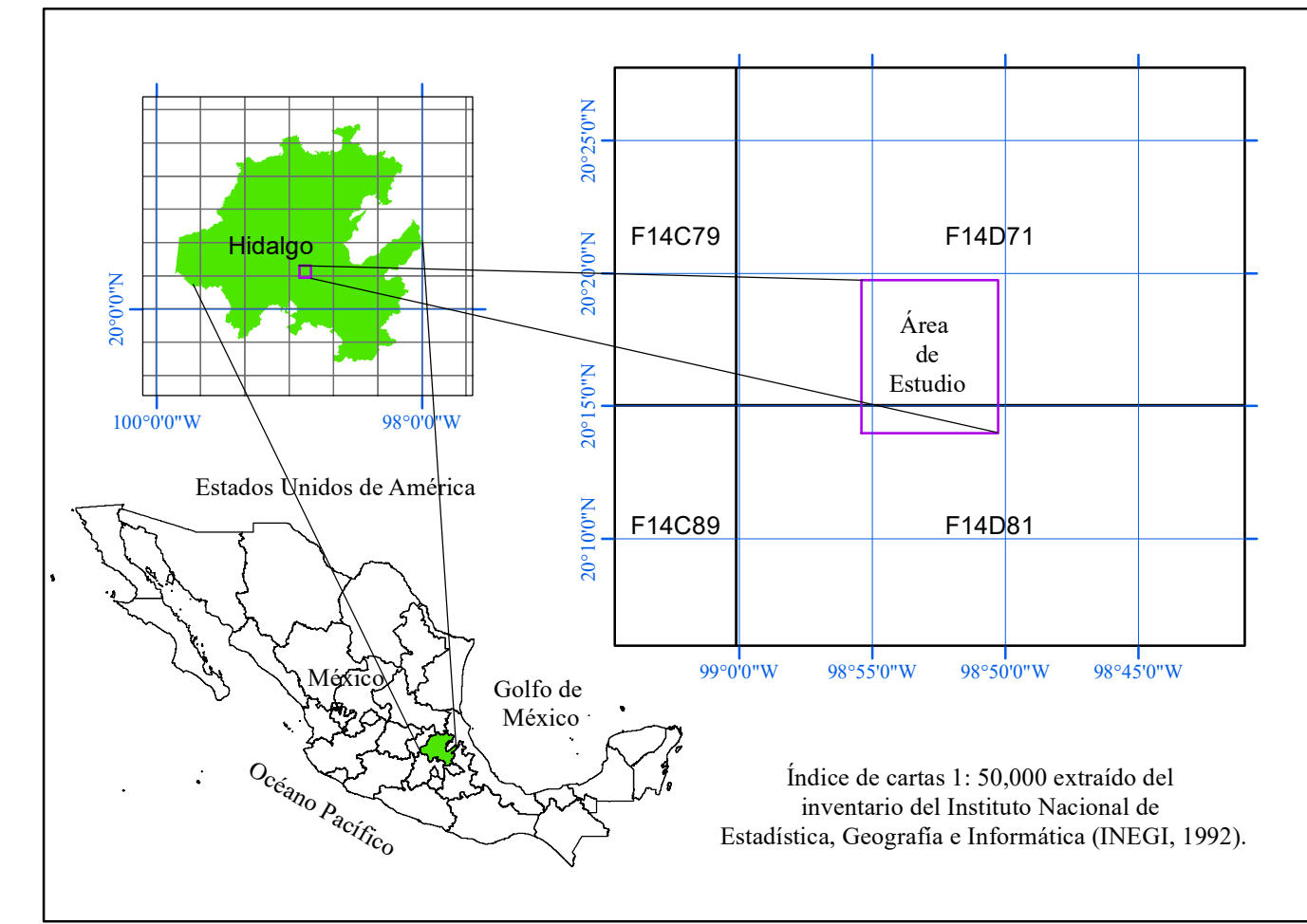
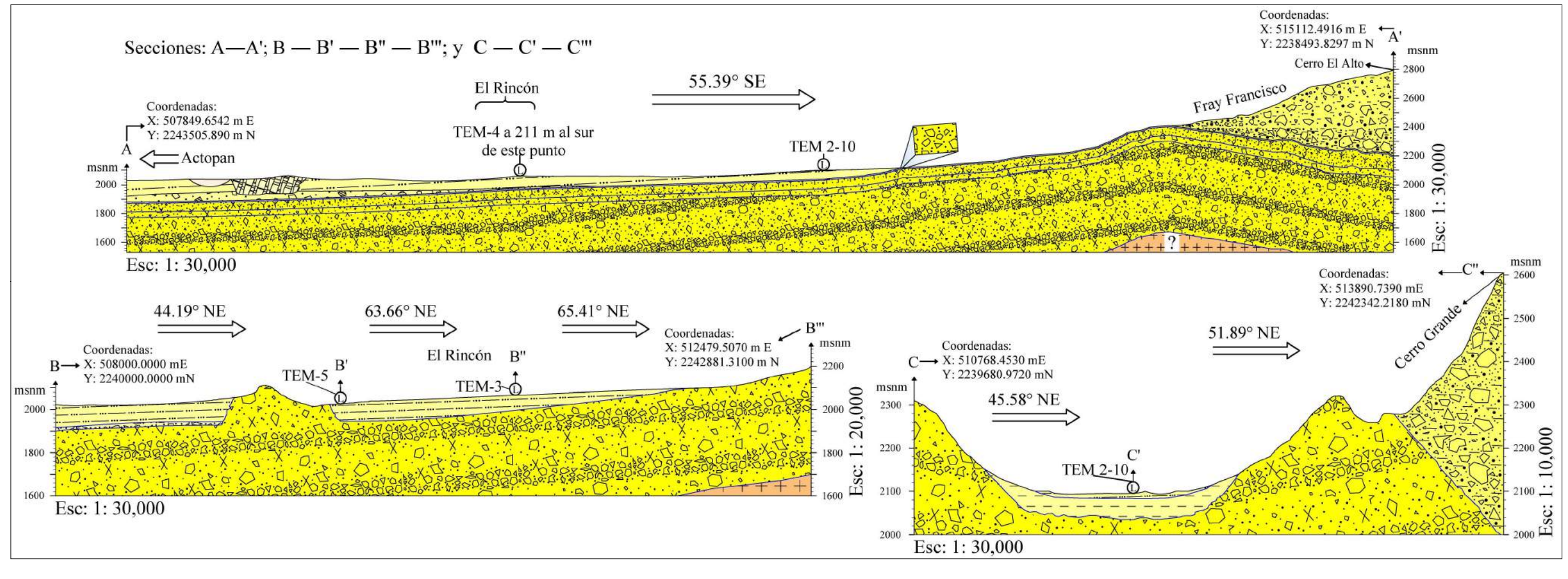
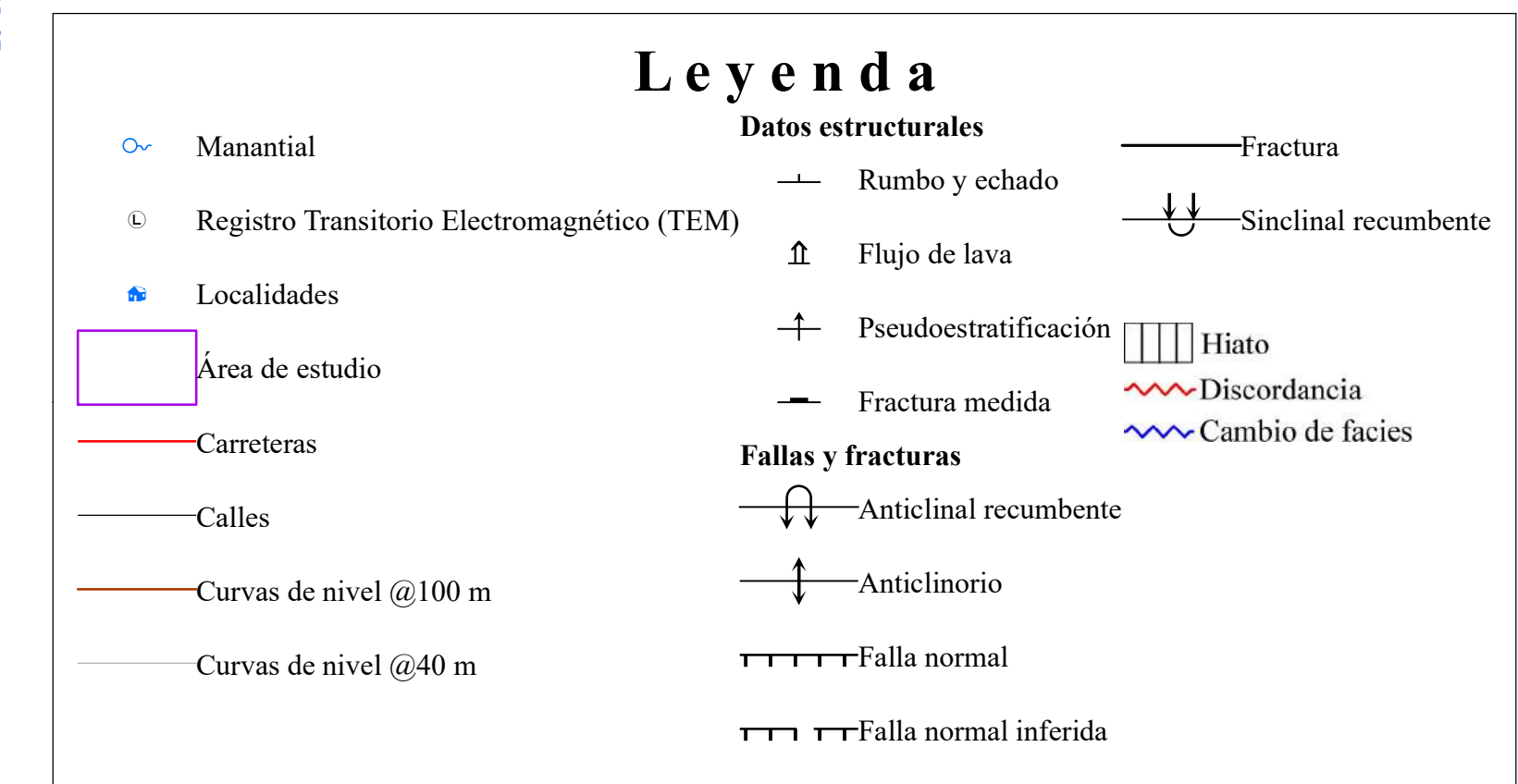
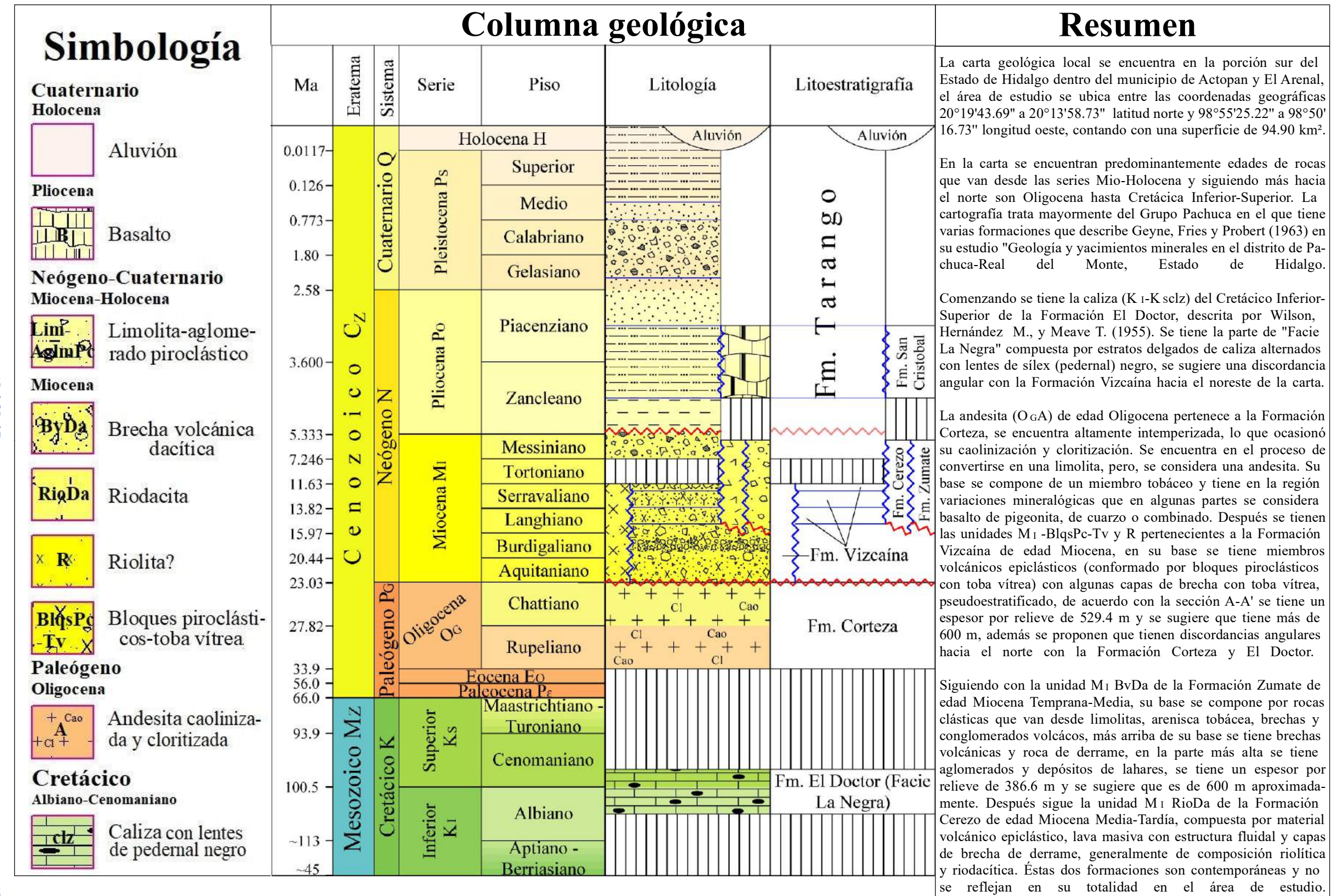
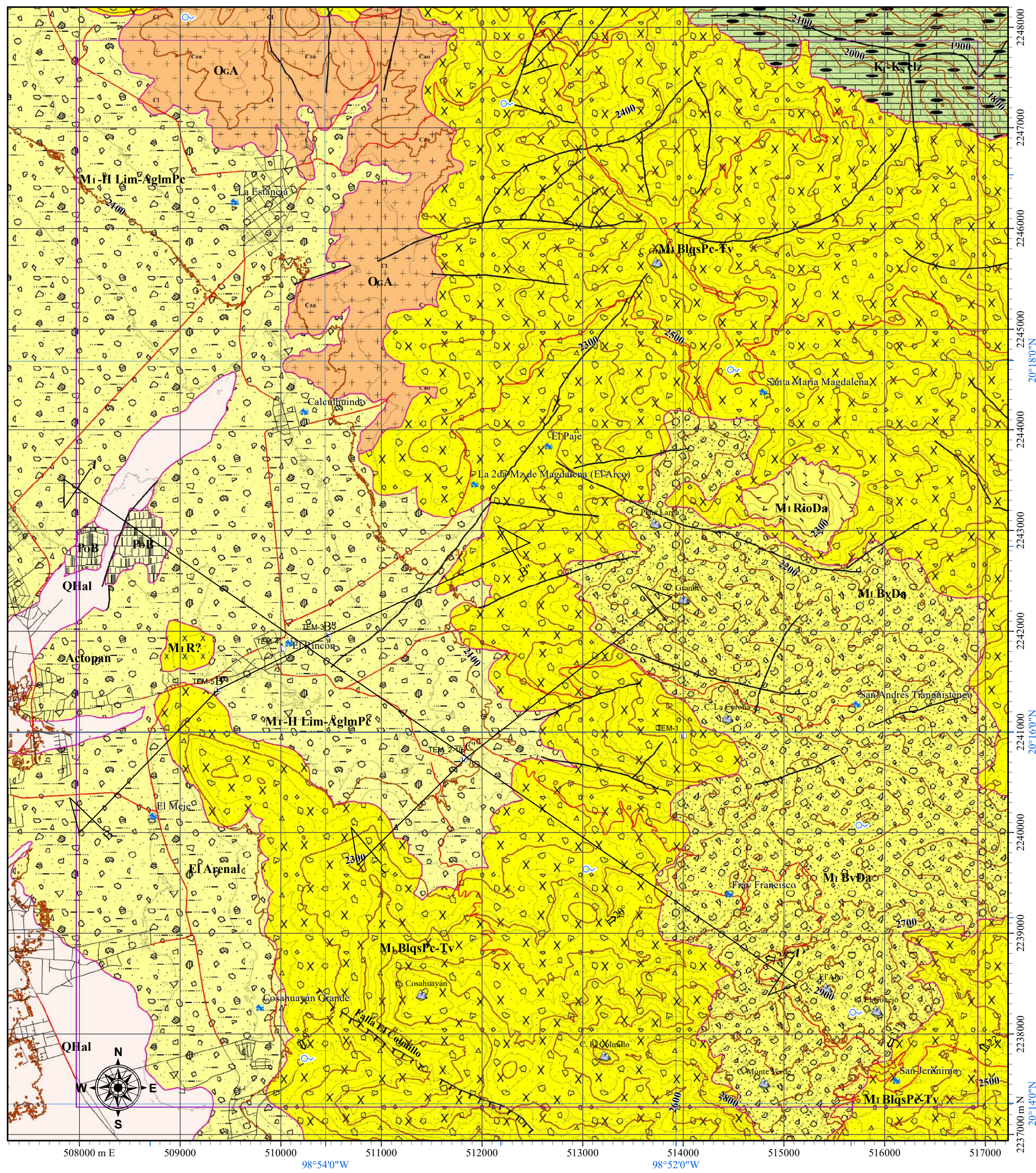
Tabla A-0-7. Rango de conductividad hidráulica en varios sedimentos (Dürbaum, 1969; citado en IAEA, 2003)







# Explicación



Los colores utilizados son conforme al código de colores de acuerdo con el mapa geológico del mundo por sus siglas en inglés "Color Code according to the Commission for the Geological Map of the World" (CGMW, Pellé, 2012)

Autor: Jaime Brandon Gutiérrez Trejo

Primera edición 2020

© 2020 Derechos reservados  
Instituto Politécnico Nacional (IPN)

Modificado de los autores De los Santos M., Barrios Rodríguez, Miranda Huerta y Sánchez Bermeo (1995) y Sánchez Rojas, Arredondo Mendoza y Cardoso Vázquez (2007) de las cartas geológico-mineras de SGM.

**Carta geológica local del área de estudio.**