



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



**MAESTRÍA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS**

**CARACTERIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL  
DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL EN LA ZONA DE  
EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA ACOCULCO, PUEBLA.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

Milagros Guadalupe Mercado Fonseca

MAESTRÍA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS

**CARACTERIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD ACTUAL  
DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL EN LA ZONA DE  
EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA ACOCULCO, PUEBLA.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

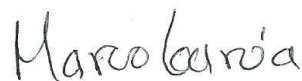
Milagros Guadalupe Mercado Fonseca

Aprobada por:



Dra. Juana Claudia Leyva Aguilera

Directora



Dr. Marco Antonio García Zarate

Co-director



Dra. Zayre Ivonne González Acevedo

Sinodal



Dr. Bernardino Ricardo Eaton González

Sinodal

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta la caracterización del sistema ambiental en la zona de Acoculco, Puebla, área seleccionada para la exploración de recursos geotérmicos. Este análisis de las características bióticas y abióticas considera como eje principal el recurso hídrico, así como las funciones que se llevan a cabo dentro de este sistema ambiental. Para esta investigación se recabaron datos de diversas plataformas oficiales, como CONAGUA, INEGI, CONABIO entre otras, así como de la literatura científica y gris. Para obtener una visualización puntual y precisa de cada uno de los componentes del sistema ambiental, se utilizaron como herramientas de análisis los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar datos por medio del software QGIS y el software Sistema Integrado de Información de Aguas y Tierras, (ILWIS, por sus siglas en inglés). Considerando variables ambientales tales como: la vegetación, geología, edafología y agricultura del sistema hidrológico de las tres subcuencas que convergen en la zona de estudio. Los datos se verificaron en salidas de campo lo cual permitió determinar los tipos de flujos que existen en la zona, encontrando flujos intermitentes y perennes. En la zona de estudio los factores abióticos tienen componentes de suma importancia, que determinan la disponibilidad del recurso hídrico superficial, que se lleva a cabo por medio de la conexión de tres subcuencas que juegan un papel importante por lo que representan hidrológicamente para la zona, así como también por los tipos de vegetación, la geología, condiciones físicas y químicas que permiten mantener un equilibrio en el ecosistema, como lo muestran los resultados del análisis de la vegetación, las actividades forestales en la zona de estudio tienen alto valor debido al manejo forestal de aprovechamiento y conservación del bosque, que se lleva a cabo. En esta investigación se muestra que superficialmente no se cuenta con disponibilidad del recurso hídrico. Los resultados obtenidos constituyen una valiosa información en manos de los tomadores de decisión que ayudan a la gestión integral de los recursos del municipio a fin de mitigar los efectos antropogénicos dentro de la zona de estudio.

Palabras clave: Sistema ambiental, hidrología, geotermia



## **ABSTRACT**

This paper presents the characterization of the environmental system in the area of Acoculco, Puebla, an area selected for the exploration of geothermal resources. This analysis of the biotic and abiotic characteristics considers the water resource as the main axis, as well as the functions carried out within this environmental system. For this research, data were collected from different official platforms, such as CONAGUA, INEGI, CONABIO among others, as well as from scientific and gray literature. To obtain a punctual and precise visualization of each of the components of the environmental system, Geographic Information Systems (GIS) were used as analysis tools to integrate data through QGIS software and the Integrated Land and Water Information System (ILWIS) software. Considering environmental variables such as: vegetation, geology, edaphology and agriculture of the hydrological system of the three sub-basins that converge in the study area. The data were verified in field trips, which made it possible to determine the types of flows that exist in the area, finding intermittent and perennial flows. In the study area, abiotic factors have extremely important components that determine the availability of surface water resources, which is carried out through the connection of three sub-basins that play an important role because of what they represent hydrologically for the area, as well as the types of vegetation, The results of the vegetation analysis show that forestry activities in the study area have a high value due to the forest management and conservation of the forest that is carried out. This research shows that superficially there is no availability of water resources. The results obtained constitute valuable information in the hands of decision makers that help in the integrated management of the municipality's resources in order to mitigate anthropogenic effects within the study area.

Keywords: Environmental system, hydrology, geothermal energy.

## DEDICATORIA

A Dios y a María Santísima.

Padres y hermanos.

Todos los ríos van al mar y el mar no se llena;

Allá donde vinieron tornan de nuevo.

Eclesiastés 1,7.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por sus programa de becas, que sustentó económicamente el posgrado y fue esencial para alcanzar este logro.

A la Universidad Autónoma de Baja California, campus Ensenada, por permitirme ser parte de crecer y desarrollarme bajos sus aulas con el apoyo de sus profesores.

A la Facultad de Ciencias, por aceptarme en el posgrado Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas MEZA, como estudiante y facilitarme los medios para culminar la maestría, así como también agradezco a cada uno de mis compañeros.

Se agradece a la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por todo su apoyo para el acceso al sitio de estudio. Además, se agradece al fondo SENER/CONACYT de Sustentabilidad Energética proyecto 2015-04-268074, por el apoyo económico a través del Paquete de Trabajo 9 del proyecto GeMex.

A cada uno de los miembros del comité a la Dra. Claudia Juana Claudia Leyva Aguilera que fungió como directora de esta investigación, al Dr. Marco Antonio García Zarate que me apoyo como Co-director, así como también a lo sinodales Dra. Zaire Ivonne González Acevedo, a la Dra. Bernardito Ricardo Eaton González.

A cada uno de mis compañeros de la generación de MEZA 2018-2020.



## TABLA DE CONTENIDO

1.- Introducción.....	1
1.1.- Antecedentes.....	2
1.2.- Justificación.....	3
1.3.-Objetivos.....	4
2.- Marco conceptual.....	5
2.1.- Cuencas.....	5
1.1.1.- Tipos de cuencas.....	5
2.1.2.- Cuenca hidrográfica.....	5
2.1.2.1.- Clasificación de arroyos.....	6
2.1.2.2.- Subcuenca.....	7
2.1.2.3.- Microcuenca.....	7
2.1.3.- Cuenca hidrológica.....	8
2.1.4.- Importancia.....	9
2.1.5.- Caracterización.....	9
3.- Zona de estudio.....	11
3.1.- Clima.....	12
3.2.- Uso de suelo y vegetación.....	13
3.3.- Hidrología.....	17
3.4.-Uso geotérmico.....	18
3.5.-Geología.....	19
3.6.-Edafología.....	20
4.- Metodología.....	23
4.1.-Obtención de datos.....	24
4.2.-Procesamiento de datos.....	24
4.3.- Análisis estadístico.....	28
4.4.-Clasificación de la hidrología.....	29
4.5.- Caracterización de la vegetación.....	31

5.- Resultados.....	32
5.1.- Describir las condiciones bióticas y abióticas.....	32
5.2.- Actividades económicas de la zona.....	33
5.3.- Disponibilidad del agua superficial en la zona.....	40
5.4.- Caracterización de la hidrología.....	41
5.5.- Clasificación de la hidrología.....	59
5.6.-Análisis geomorfológico asociado a la cuenca hidrográfica.....	62
6.- Discusión.....	64
7.- Conclusiones.....	67
8.- Recomendación .....	69
9.- Bibliografía.....	69
10.- Anexo.....	74

## **LISTA DE FIGURAS**

Fig 1.- Modelo esquemático de un yacimiento geotérmico.....	4
Fig 2.- Imágenes de tipos de cuencas hidrográficas.....	7
Fig 3 Clasificación de arroyos.....	9
Fig 4.-Clasificación de cuencas.....	10
Fig 5.- Zona de estudio.....	13
Fig 6.- Precipitación de la zona de estudio, Conagua 2014.....	14
Fig 7.- Tipo de suelos y agricultura en la zona de estudio.....	16
Fig 8.- Tipos de vegetación en la zona de estudio.....	17
Fig 9.- Cuencas a una macro-escala.....	18
Fig 10.- Subcuencas que conectan en la zona de estudio.....	19
Fig 11.-Tipo de geología presente en la zona de estudio.....	22
Fig 12.- Tipo de edafología presente en la zona de estudio.....	24
Fig 13.- Subcuencas que convergen en la zona de estudio.....	31
Fig 14.- Pozos por CFE dentro de la zona de estudio.....	33

Fig 15.- Actividad que muestra cultura de la zona de estudio.....	34
Fig 16.- Actividad minera dentro de la zona de estudio.....	35
Fig 17.- Mapa de polígonos de minería en la zona de estudio.....	36
Fig 18.- Agricultura de la zona por percepción remota.....	37
Fig 19.- Tipos de vegetación de la serie I.....	40
Fig 20.- Tipos de vegetación de la serie VI.....	40
Fig 21.- Polígonos de Thiessen en las tres subcuencas.....	41
Fig 22.- Mapa de las estaciones utilizadas.....	42
Fig 23.- Mapa de la hidrología de la zona de estudio.....	43
Fig 24.- Precipitación media del 2007 de la zona de estudio.....	44
Fig 25.- Gráfica de la precipitación media del 2007 en la zona de estudio.....	45
Fig 26.- Precipitación media del año 2008.....	45
Fig 27.- Gráfica de precipitación media del 2008 en la zona de estudio.....	46
Fig 28.- Precipitación media anual del año 2009.....	46
Fig 29.- Precipitación media 2009 de la zona de estudio.....	47
Fig 30.- Precipitación media anual del año 2010 de la zona de estudio.....	47
Fig 31.-Gráfica la precipitación media del año 2010 de la zona de estudio.....	48
Fig 32.- Precipitación media anual del año 2011, de la zona de estudio.....	48
Fig 33.- Gráfica de precipitación media del 2011 de la zona de estudio.....	49
Fig 34.- Precipitación media anual del año 2012, de la zona de estudio.....	49
Fig 35.- Gráfica de precipitación media del 2012 de la zona de estudio.....	50
Fig 36.- Precipitación media del 2013, de la zona de estudio.....	50
Fig 37.- Gráfica de precipitación media del 2013.....	51
Fig 38.- Precipitación media del 2014, de la zona de estudio.....	51
Fig 39.-Gráfica de precipitación media del 2014, de la zona de estudio.....	52
Fig 40.-Precipitación media de las 5 estaciones utilizadas, en la zona de estudio...52	
Fig 41.- Gráfica de precipitación anual del 2007.....	53
Fig 42.- Gráfica de precipitación anual del 2008.....	53

Fig 43.- Gráfica de precipitación anual del 2009.....	54
Fig 44.- Gráfica de precipitación anual del 2010.....	55
Fig 45.- Gráfica de precipitación anual del 2011.....	55
Fig 46.- Gráfica de precipitación anual del 2012.....	56
Fig 47.- Gráfica de precipitación anual del 2013.....	56
Fig 48.- Gráfica de precipitación anual del 2014.....	57
Fig 49.- Precipitaciones de la est. Chignahuapan, con respecto a los fenómenos del niño y la niña. CONAGUA.....	58
Fig 50.- Recorrido de campo dentro de la zona de estudio.....	59
Fig 51.- Tipos de flujos en la zona de estudio.....	60
Fig 52.- Dirección del flujo en la zona de estudio.....	61
Fig 53.- Dirección de flujo a mayor puntualidad en la zona de estudio.....	62
Fig 54.- Subcuencas, con relación a manifestaciones de azufre.....	63
<b>ANEXOS</b>	
Fig 55.- Muestra las cuencas a macro escala.....	74
Fig 56.- Muestra las cuencas con relación a los estados.....	75
Fig 57.- Subcuencas que convergen en la zona de estudio.....	75
Fig 58.- Subcuencas y sistemas de órdenes.....	76
Fig 59.- Muestra la zona de estudio.....	76
Fig 60.- Estaciones que se utilizaron para el análisis de precipitación.....	77
Fig 61.- Zona buffer para el análisis de precipitación.....	77
Fig 62.- Precipitación de la zona, conforme al área buffer.....	78
Fig 63.- Interpolación de precipitación en la zona de estudio.....	79
Fig 64.- Precipitación promedio de la zona de estudio.....	78
Fig 65.- Precipitación de la zona de estudio.....	78
Fig 66.- Geología de la zona de estudio.....	79
Fig 67.- Edafología de la zona de estudio.....	79
Fig 68.- Dirección de flujos que convergen en la zona de estudio.....	80

Fig 69.- Evaporación de la zona de estudio.....	81
Fig 70.- Temperaturas máximas de la zona de estudio.....	81
Fig 71.- Temperaturas mínimas de la zona de estudio.....	82
Fig 72.- Vegetación y el sistema de orden hídrico.....	82
Fig 73.- Vegetación de la zona de estudio.....	83
Fig 74.-Microcuencas de la zona de estudio.....	83

### **LISTA DE TABLAS**

Tabla I.- Descripción y tamaño de cuencas.....	13
Tabla II.- Tipo de vegetación existente en la zona de estudio.....	16
Tabla III.- Datos de descarga de cada una de las subcuencas.....	27
Tabla IV.- Fórmula de Thiessen.....	30
Tabla V.- Superficie de cada de las subcuencas.....	32
Tabla VI.- Pérdidas y ganancias de las actividades de la zona de estudio.....	39
Tabla VII.- Características de las subcuencas.....	65
Tabla VIII.- Características geomorfológicas de las cuencas.....	66
Tabla general de las pérdidas de vegetación.....	87



## 1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en México se presentan diferentes problemas ambientales tales como: la degradación ambiental, deforestación, sobreexplotación de recursos hídricos, pérdida de biodiversidad y conflictos ambientales que se transforman en problemas sociales. Esta situación ha pasado a ser tema principal a nivel nacional y afecta directamente la sustentabilidad de la sociedad por completo (Pérez, 2004).

Recientemente se han realizado múltiples investigaciones que permiten determinar la progresiva carencia de agua para el uso y consumo humano, de esto se deriva la importancia de tener claro el trabajo para el manejo integral de cuencas, debido a que presenta un amplio enfoque en la preservación de los recursos naturales, manteniendo el eje del recurso hídrico (World, 2004).

El agua es el vínculo entre las actividades del ser humano y las cuencas, en ocasiones suele ser imperceptible para los ciudadanos en general, pero muy importante para quienes desarrollan actividades o dependen del campo, tales como: agricultura y ganadería (Moreno, 2015).

La Ley de Aguas Nacionales en México DOF 24-03-2016, define como cuenca hidrográfica, exclusivamente las aguas superficiales, áreas que están delimitadas por un parteaguas, línea que se forma por los puntos de mayor elevación de la cual fluye la precipitación que se presenta dentro de un territorio determinado, que puede ser almacenada o continuar su recorrido hasta encontrar un punto de salida como puede ser, mar, lago, río o algún otro tipo de cuerpo receptor, a esto se le conoce como red hidrográfica de cauces que conllevan a un punto principal (CONAGUA, 2016a).

Puntualizando en las cuencas hidrográficas son áreas en los que se logra conocer con claridad el recurso hídrico superficial, las cuencas a su vez funcionan como elementos de territorio en los que se lleva a cabo una mejor planeación y a su vez un mejor manejo integrado de dicho recurso, así como también de los recursos naturales que forman parte de un territorio (Moreno, 2015).

Es por ello, que es necesario entender la importancia del recurso hídrico, ya que este permite determinar el estado actual, así como también los factores de presión tanto

espacial como temporal, dichos factores permiten construir lineamientos para la planeación y protección considerando su uso actual, como futuros (Gálvez, 2011).

El estudio integral de cuencas hidrográficas permite conocer el estado actual de una zona, las condiciones del recurso hídrico superficial, así como también a los actores que se encuentran involucrados en su aprovechamiento. Es también de importancia, un diagnóstico de cuáles pueden ser los cambios en corto o mediano plazo, ya sea cambios naturales o cambios antropogénicos.

Dicho análisis consiste en dar a conocer las condiciones en función del recurso hídrico superficial en la que se encuentra la zona de estudio Aocolco, Puebla, con posibilidad de instalación de una planta geotérmica como fuente de energía.

### 1.1.- ANTECEDENTES

En particular el manejo de cuencas se divide en dos grandes periodos el primero comprende de 1960 a 1985, periodo en que se define para trabajar en un contexto de manejo sectorial con dirección a los sectores de los recursos hídricos, agroforestales y a la agricultura extensiva. Posteriormente, existe un segundo periodo que va desde 1986 a 2004, fase en que se continúa con el manejo sectorial, pero sobre todo toma una mayor relevancia el actualmente llamado manejo integral, el cual hace un enfoque medioambiental con un punto de vista positivo que mueve a las personas a realizar una acción para la mejora del medio ambiente (Moreno, 2015).

El inicio de la exploración y desarrollo de las plantas geotermoeléctricas fue en Italia, en la década de los treinta. Posteriormente, en el año 1959 se instala la primera planta en el continente americano en el campo de Pathé, México, con una unidad de 3.5 MW de capacidad, este campo geotérmico entró en operación el 20 noviembre de 1959, sólo operó a una fracción de sus capacidades, por lo cual sólo continuó con la actividad hasta 1973 (Maya & Gutiérrez, 2007) Actualmente existen 27 países que hacen uso de la geotermia para la generación de electricidad, entre estos países se encuentra México que ocupa el sexto lugar a nivel mundial (Huttrer, 2021).

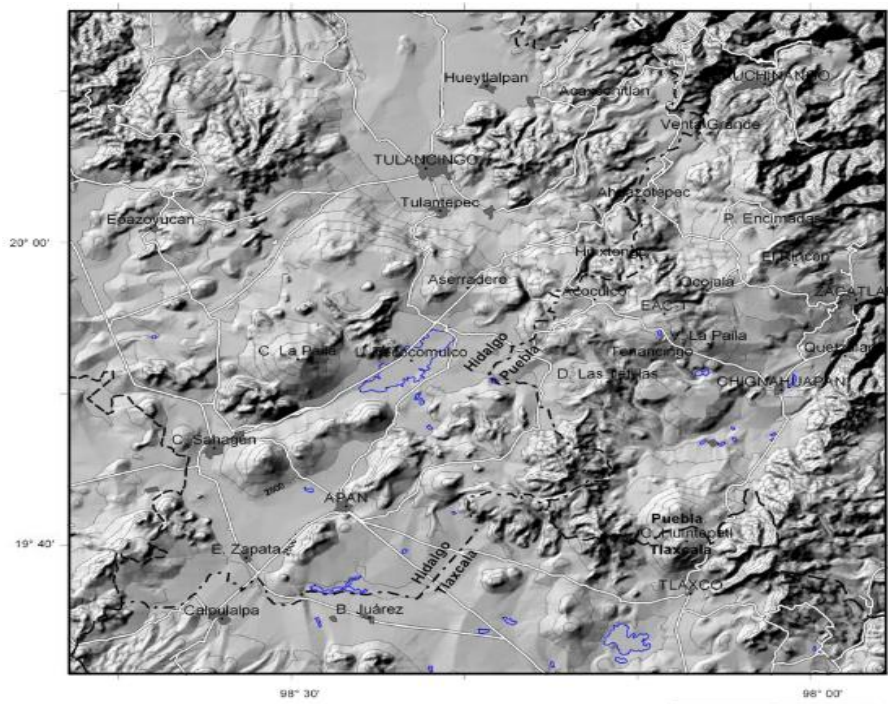
Mediante diversos estudios, la geotermia es conocida como una fuente de energía renovable y limpia, la cual permite generar electricidad, cuidando de alguna manera las condiciones ambientales. La energía geotérmica actualmente es consumida por la mitad de México (Santoyo & Barragán, 2010).

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es el organismo público a cargo de la generación, transmisión y comercialización de la energía en México. Actualmente, existen cinco campos geotermoeléctricos que operan coordinados a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), mismos que tiene sede en Morelia, Michoacán. Los campos en función son: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros, Las Tres Vírgenes y Domo de San Pedro. En dichos campos, se cuenta con 37 unidades geotermoeléctricas, con capacidad instalada de geotérmica-eléctrica es de 1005.8 MWe, con capacidad de funcionamiento y operativa es de 947,8 MWe. Cerro Prieto sigue siendo el campo más grande de México y el segundo a nivel mundial con una capacidad de 570 MWe en operación el campo Cerrito colorados con un potencial de 75 MWe, el cual es confirmado por varios pozos profundos que fueron perforados en la década de los ochenta dónde, aún puede presentar mejores condiciones, según (Gutiérrez- Negrín et al, 2015) la capacidad geotérmica instalada en México ha disminuido 1.1.% en los últimos cinco años (2015-2019), pero la capacidad de funcionamiento aumentó 13% en el mismo período. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha obtenido permiso de exploración en 13 zonas geotérmicas en diversos estados, así como también se están explotando 13 zonas adicionales con sus propios permisos de exploración otorgados después que se promulgó la Ley de Energía Geotérmica aprobada en el 2014. Los recursos hidrotermales convencionales y 3.800 MWt de aplicaciones de usos directos de energía geotérmica para el mismo año.

El 63% de los cuales podrían proceder de usos de cascada en campos geotérmicos. Estos datos significan un crecimiento del 70% para la energía geotérmica y a su vez más de 24 veces para usos directos en la próxima década. El Centro Mexicano de Innovación en Energía (CeMle- Geo), (Gemex, 2021).

Dichos proyectos se encuentran en diversas etapas de desarrollo, por lo tanto, se considera que el desarrollo de la energía geotermoeléctrica es muy importante para el futuro en México (Maya & Gutiérrez, 2007), (Méndez, et al, 20119

Dentro de la zona de estudio se ha llevado a cabo dos perforaciones a nivel de exploración por parte de CFE, el primero de ellos es el EAC-1 que fue perforado en el año 1995 y el EAC-2 que fue perforado en 2008 (Méndez, et al, 2011). Mismos que sugieren un potencial sistema geotérmico mejorado, debido a su baja permeabilidad y a sus manifestaciones termales muy distintivas. Ya que no cuentan con termalismo evidente, donde la descarga de fluidos calientes en superficie es prácticamente nula, con una temperatura que presenta apenas 49°C, la cual se encuentra a una distancia de 18 km al SE de los Azufres – El Potrero La Alcaparrosa (García Aguirre, 2012; Méndez, Armenta, Silva, 2011). En la zona, solo hay emisión de gases fríos de origen magmático, a través de pequeñas grietas presentes en la superficie. Por lo tanto, la característica mencionada anteriormente revela que prácticamente existe una capa sello casi perfecta (Gildardo et al., 2016) (Figura 1).



**Figura 1.-** Imagen tomada de López Hernández, 2009.

Por otro lado, el mismo estudio revela que, en un futuro y con un amplio rango de diversas investigaciones, el área de Acozulco, Puebla puede llegar a ser un campo geotérmico con un alto potencial (Gildardo et al., 2016).

## 1.2.- JUSTIFICACIÓN

1.- ¿Cuáles son las características del recurso hídrico superficial en la zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla?

Aún se conoce muy poco sobre el nivel de riesgo en el que se encuentran las condiciones hidrológicas. Aún se cuenta con pocas estimaciones de riesgo a nivel de cuenca, como también del grado de vulnerabilidad actual y futura de los sistemas. Por lo tanto, aquellas cuencas que presentan importancia económica, ambiental y social son de prioridad para las actividades que se llevan a cabo. También son un eje para su estudio, para determinar el riesgo de los sistemas humanos y naturales ante el cambio climático (Bando et al., 2007).

En términos de macro escala, en todo el país se esperan incrementos de temperatura media anual desde 0.4 y hasta 1.7 °C en los siguientes años de 2010 al 2030, (Conagua 2016). Este impacto, relacionado con la disminución de precipitación, por ejemplo, de más del 10% lleva a las cuencas de México a tener problemas y con ellos también las actividades que se basan en el uso del recurso hídrico como: agricultura, ganadería, salud y actividades forestales entre otras (Bando et al., 2007).

Debido a las condiciones que se presentan, es necesario abordar urgentemente esta problemática de manera integrada y sobre todo coordinada. Tomando en cuenta que el agua es el único elemento crucial para el ser humano, su manejo y disponibilidad, estará determinando su uso. Así también los recursos territoriales y naturales, siendo la cuenca hidrográfica la unidad geográfica que contribuiría atendiendo dichas relaciones, tanto de manera espacial como funcional en el tiempo (Bando et al., 2007).

## 1.3.- OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Caracterizar la disponibilidad actual del recurso hídrico superficial en la zona de exploración geotérmica Acoculco, Puebla.

### **Objetivos específicos**

- 1.- Describir las condiciones bióticas y abióticas de la zona.
- 2.- Delimitar la zona en función de la hidrología superficial y uso del recurso hídrico.
- 3.- Clasificar las unidades hidrográficas en función de las interacciones y vulnerabilidad entre los usuarios.

## 2.-MARCO CONCEPTUAL

### 2.1.-Cuencas

Desde el punto de vista hidrológico, México está constituido por 37 cuencas hidrográficas, las cuales se encuentran agrupadas en 13 regiones hidrológico-administrativas; y a su vez se dividen en subcuencas y microcuencas (Trujano, 2016).

En el contexto de cuencas, se ha reconocido como el área o unidad superficial de planeación más utilizada para llevar a cabo diversos trabajos, ya sea en el ámbito ecológico, económico o social. Una cuenca es un área de mayor a 50 mil hectáreas, las subcuencas van desde 5 mil a 50 mil hectáreas y las microcuencas entre 3 mil y 5 mil hectáreas, siempre y cuando las condiciones de elevaciones que constituyen al relieve o la orografía lo permitan, siendo así, existen microcuencas de menos de 3 mil hectáreas (Trujano, 2016).

Las cuencas se forman por el cauce tributario o también se le conoce como cuencas tributarias o subcuencas comúnmente conocidas. Se conoce que entre mayor densidad de tributarios existan en una cuenca, esta responde más rápido a la precipitación. Por lo tanto, la mejor manera de identificar una cuenca es conociendo el orden tributario u orden de drenaje que se forma mediante características físicas de una cuenca (Gonçalves et al, 2007).

Existen dos tipos de cuencas, hidrográficas e hidrológicas:

## **2.2 Cuenca hidrográfica**

Las características que distinguen a las cuencas hidrográficas es que cuentan con una entrada y una salida del recurso hídrico. Por ejemplo, dentro del enfoque del ciclo hidrológico se logra identificar y cuantificar la entrada de agua en la cuenca por medio de la precipitación, por lo tanto, también se logra conocer la cantidad de agua que sale, enfocada a un río principal (Gonçalves, et al, 2007, Moreno, 2015).

Otro de los parámetros importantes de las cuencas hidrográficas es el parteaguas o también denominado línea imaginaria, por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo, los cuales en función a las características topográficas del medio pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos (Llerena, 2003), manera por la cual la cuenca solo tiene una salida, lugar por donde recorre el cauce principal de la misma (Gonçalves, et al, 2007).

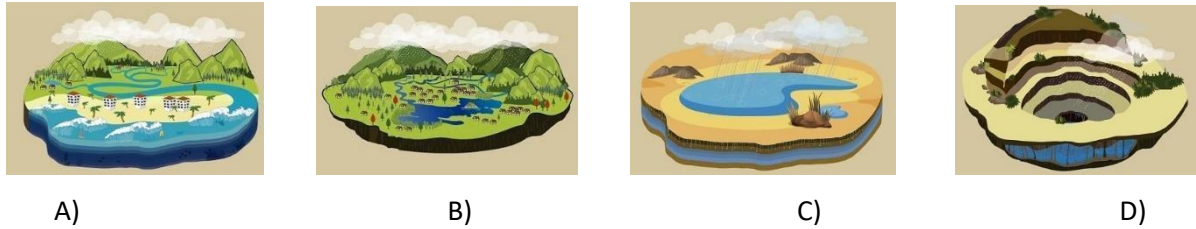
Las cuencas hidrográficas, se clasifican por el sistema de drenaje y su conducción final o punto de salida las cuales reciben por nombres; exorreicas, endorreicas, arréicas y criptorreicas. Cómo se logra apreciar en la figura 2.

A.- Exorreicas, se presentan cuando el agua forma parte de un escurrimiento y dirige las aguas al sistema de mayor capacidad de drenaje, como puede ser un gran río o directamente al mar.

B.- Endorreicas, estas se presentan cuando la precipitación drena o se dirige hacia un embalse o lago sin conectar directamente con el mar.

C.- Arréicas, estas se identifican cuando no logran llegar a un río, lago o mar, por lo tanto, sus aguas se pierden por medio de la evaporación o infiltración sin llegar a ser parte de un escurrimiento.

D.- Criptorreicas, estas se presentan en zonas cársticas, zonas en las cuales el drenaje o flujos superficiales no tienen un sistema constituido, por lo tanto, corren como ríos subterráneos (Gonçalves, et al, 2007, SEMARNAT, 2013).



**Figura 2.-** Tipos de cuencas, Gutiérrez A, 2021A) Exorreicas B) endorreicas C) Arréicas D) criptorréicas.

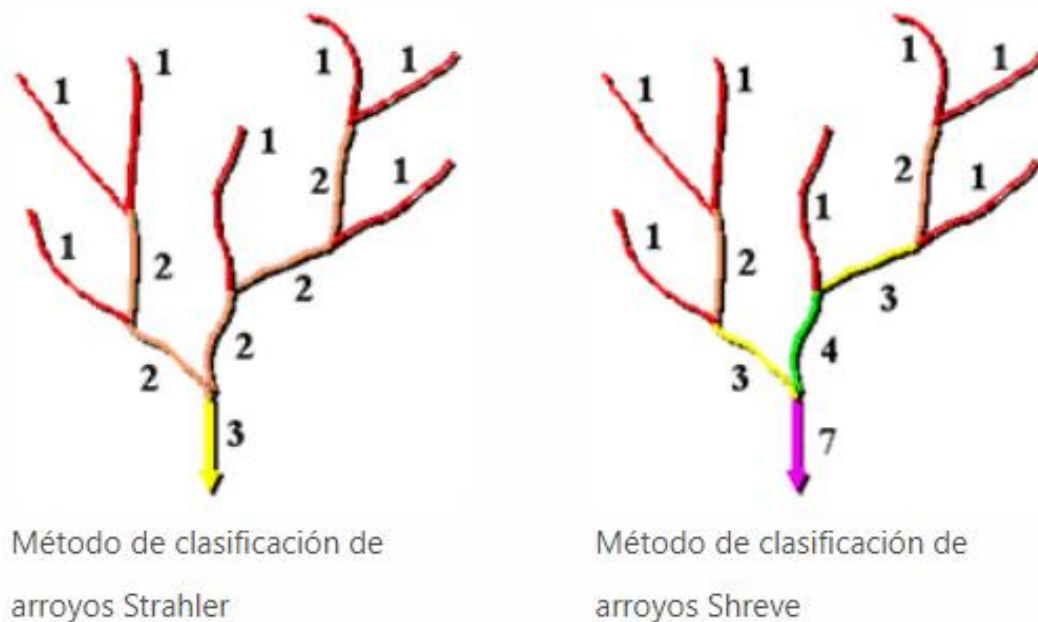
Estudios realizados por Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT 2013), mencionan que, por el factor de la fuerza de gravedad, los elementos que se encuentran cuenca arriba podrán ser arrastrados superficialmente a la cuenca baja, lo cual permite un vínculo directo entre cuenca alta, media y baja. El sistema hidrológico (red hidrográfica) de una cuenca puede funcionar de diferentes maneras, ya sea que afecte o beneficie a la zona, también por su calidad y/o cantidad de agua para la adaptación de los ecosistemas, así como las actividades sociales y la vida de los habitantes.

Es por ello que es de vital importancia, estudiar, conocer las características de una cuenca, así como también sus movimientos que surgen en ella tales como la movilidad del agua (escurrimientos), suelos, contaminantes o incluso nutrientes los cuales provienen de la parte alta de la cuenca, creando una vinculación física entre diferentes ecosistemas e incluso poblaciones alejadas unas de otras (SEMARNAT, 2013).

### **Clasificación de arroyos**

La clasificación de arroyos es un método que asigna un orden numérico a los vínculos en una red de arroyos. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes. Se puede inferir algunas características de los arroyos simplemente al conocer el orden. Por ejemplo, los arroyos de primer orden están denominados por un flujo de agua por tierra; no tiene un flujo concentrado de aguas arriba. (Tarboton, Rodríguez 1991).

La herramienta de clasificación de arroyos tiene dos métodos para asignar órdenes. Los métodos propuestos son los siguientes: Strathler (1957) y Shreve (1966), y se observan en la figura 3.



**Figura 3.-** Métodos para la clasificación de arroyos. Tomada de (Tarboton, Rodríguez 1991).

Método Strahler.- En este método se asigna un orden de 1 a todos los vínculos sin afluentes y se les conoce como de primer orden.

La clasificación de arroyos aumenta cuando los arroyos del mismo orden intersecan. Por lo tanto, la intersección de los vínculos de primer orden declara un vínculo de segundo orden, la intersección de dos vínculos de distintos órdenes no aumentará el orden. Por ejemplo, la intersección de un vínculo de primer orden y segundo orden no creará un vínculo de tercer orden, pero mantendrá el orden de vínculo con el orden más alto. Este método de clasificación de arroyos es el más conocido, debido a que este método solo aumenta el orden en las intersecciones del mismo orden, no tiene en cuenta todos los vínculos y puede ser susceptible a la adición o remoción de vínculos (Tarboton, Rodríguez 1991).

Método de Shreve. – Este método tiene en cuenta todos los vínculos en la red. Al igual que en el método de Strahler, a todos los vínculos exteriores se les asigna un orden de 1. Para los vínculos anteriores del método Shreve, sin embargo, los órdenes son aditivos.

Por ejemplo, la intersección de dos vínculos de primer orden crea un vínculo de segundo orden, la intersección de un vínculo de primer orden y uno de segundo orden crea un vínculo de tercer orden, y la intersección de un vínculo de segundo orden y uno de tercer orden crea un vínculo de cuarto orden (Tarboton, Rodríguez 1991). Debido a que los órdenes son aditivos, los números del método de Shreve se conocen como magnitudes en lugar de órdenes. La magnitud en el método de Shreve es el número de arroyos arriba (Tarboton, Rodríguez 1991).

Haciendo mención al sistema de orden de las corrientes presentes, está manifiesta el grado de ramificaciones o bifurcación dentro de una cuenca. Horton 1932, 1945) clasificó el orden de las corrientes dando lugar el orden de 1 a las pequeñas, es decir, las que no presentan ramificaciones: el orden 2 a las corrientes que solo tienen ramificaciones o tributarios de orden 2 o menos. Por lo tanto, indica que el orden de la corriente principal es un indicador guía de la dimensión de la ramificación y sobre todo de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca (Aranda, 1998).

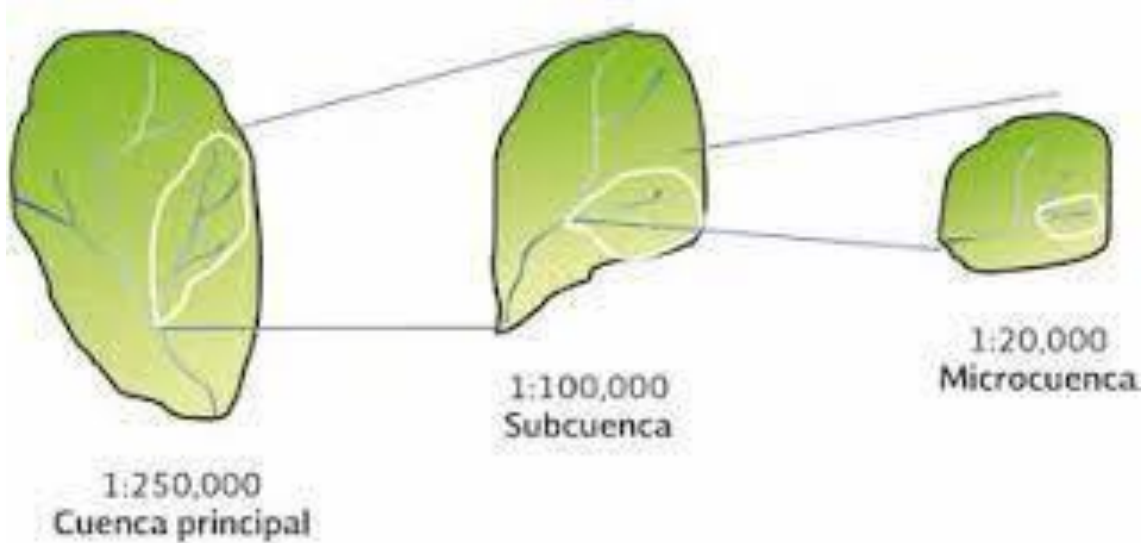
#### **2.2.1.2.- Subcuenca**

Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente (Ordóñez, 2011). Por otro lado, también se menciona que, en esta zona funciona como una identificación de los sectores y usuarios. Donde entran instituciones para llevar a cabo la planeación para una auténtica gestión (Cotler & Pineda, 2008) como se ilustra en la figura 4.

#### **2.2.2.3.- Microcuenca.**

Se conoce que las microcuencas son las unidades o áreas esenciales para la planeación debido a su tamaño, en el cual se presenta una mejor dirección para medir los indicadores de sustentabilidad, ya que en cuencas grandes cuesta más llevar a cabo la planeación (Trujano, 2016). Como se ilustra en la figura 4.

Dentro de esta unidad se lleva a cabo una gestión activa de la población, en el cual se atienden problemas relacionados con calidad del medio ambiente, con el objetivo de mejorar la calidad de vida (Cotler & Pineda, 2008).



**Figura 4.-** Diferencia de tamaños entre cuencas, subcuencas, y microcuencas. Imagen obtenida de google Chrome.

### 2.3 Cuenca hidrológica

Las cuencas hidrológicas o colectoras, también llamadas cuencas de captación, son aquellas áreas de tierra que captan y llevan el agua de escurrimiento hasta las denominadas masas de agua superficial; son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socio-ecológicos están íntimamente ligados entre sí.

En ellas, el manejo se entiende como un proceso de planeación, implementación y evaluación de acciones mediante la participación organizada e informada de la población. Este término se enfoca en la relación que existe entre el agua y el subsuelo, por lo cual, se incluyen directamente los aspectos geológicos, cuya conexión permite identificar la disposición de acuíferos, así como también las zonas de recarga (Moreno, 2015).

Al agua que fluye por la superficie de la tierra hasta los cuerpos o masas de agua en la superficie se le conoce como escurrimiento superficial y al agua que fluye por los ríos hasta los océanos se le denomina escurrimiento fluvial. Se considera que el 69% del agua que llega a los ríos en toda la Tierra proviene de la lluvia y de la nieve derretida en sus cuencas, y el agua restante proviene de descargas de agua subterránea. Las cuencas fluviales, alimentadas en gran parte por la lluvia, ocupan el 60% del área de tierra firme y sustentan al 90% de la población mundial. Estos flujos superficiales y

subterráneos, tienen una estrecha conexión, por ende, es necesario conocer y estudiar sus características y dinámicas de manera interconectada (SEMARNAT, 2013).

### **2.3.1.- Importancia**

Las cuencas hidrológicas están en constante modificación. Su grado de alteración depende de la intensidad de la erosión de los suelos debido a las lluvias, a los procesos de desglaciación, de la cobertura vegetal, de su geología y especialmente de la acción de la sociedad humana que en su afán de un "mejor acondicionamiento" no repara en destruir el ordenamiento natural que es el más armónico y permanente dentro de un ecosistema (Windows, Corporation, Hori, & Sakajiri, 2011).

Así, en la cuenca hidrográfica existe un ordenamiento natural el cual, si ha desaparecido o alterado, es conveniente adecuarlo o regenerarlo tratando siempre que este ordenamiento que debe ser en función de la sociedad humana no afecte la armonía de la naturaleza y dentro de este acondicionamiento es lícito desarrollar un adecuado sistema vial que facilite el ordenamiento; así mismo, un apropiado sistema de captación, almacenamiento y distribución del agua, que es el elemento vital, Hori y Sawajiri, 2011; Jefferson et al., 2015).

### **2.3.2.- Caracterización**

**Características de la cuenca.** (López y Blanco, 1976), consideran que las características de la cuenca son las puramente geométricas en relación con su relieve topográfico; dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

**Índice de compacidad:** Es el contorno que define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente. La forma tiene influencia sobre los escurrimientos; estos a su vez serán diferentes entre una cuenca casi redonda y una estrecha y alargada de la misma superficie. También el tiempo de concentración depende de la forma. El índice admitido para representar dicha característica, es el coeficiente de compacidad de Gravelius, que relaciona el perímetro de la cuenca con el de un círculo que tuviera la misma superficie.

**El relieve:** El relieve se puede definir por la curva hipsométrica de la cuenca que representa gráficamente cotas del terreno en función de las superficies correspondientes.

A mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje afluentes al curso principal (López y Blanco, 1976).

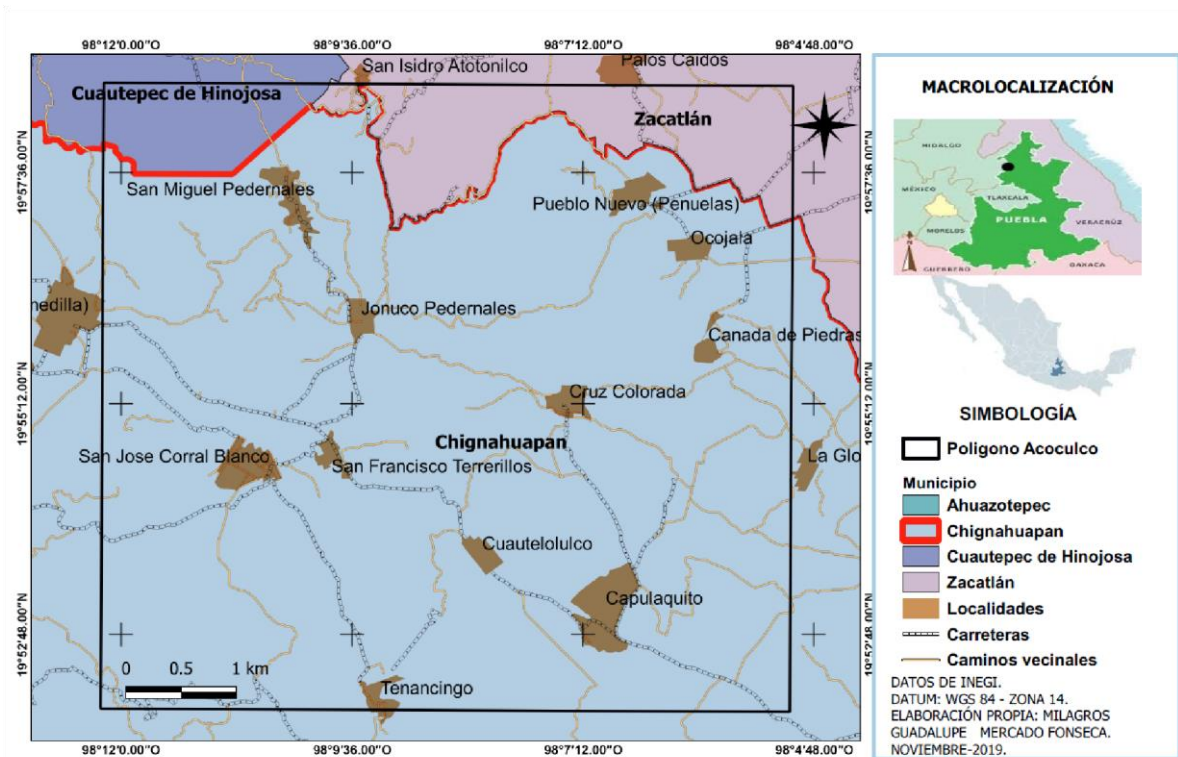
**La red hidrográfica:** López y Blanco (1976), afirman que la red hidrográfica es el drenaje natural, permanente o temporal por el que fluye las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos. La densidad de drenaje está definida como la longitud media de curso por km<sup>2</sup>; es decir, la relación entre la suma de longitudes de cursos que se integran en la cuenca, a la superficie de dicha cuenca. El estudio de la red hidrográfica debe completarse con el perfil longitudinal del curso principal y sus afluentes.

Tabla I.- Relación del tamaño de la cuenca (Campos Aranda, 1998).

<b>Tamaño de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descripción</b>
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2,500	Intermedia – pequeña
500 a 2,500	Intermedia grande
2,500 a 5,000	Grande
5,000 >	Muy grande

### **3.- ZONA DE ESTUDIO**

La zona se localiza casi en los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, en el municipio de Chignahuapan, Pue., a 85 kilómetros al noroeste de la ciudad de Puebla y a 65 kilómetros al sureste de la ciudad de Pachuca Hgo., entre las coordenadas 19°47" y 20°02" de latitud norte y 97°55" y 98°20" de longitud oeste. Su elevación varía entre los 2800 y 2900 msnm. Se tiene acceso a ella por las carreteras federales 199 y 132, a partir de las cuales se siguen diversas carreteras de terracería (Hiriart et al., 2011).



**Figura 5.-** Mapa de la zona de estudio.

El área de estudio se encuentra en el sector oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), detrás del frente volcánico actual y a una distancia promedio de 75 km al noreste de la Ciudad de México, (Gildardo y Gama, 2016; García-Palomo et al, 2002).

Esta división se concreta como un arco volcánico de 1000 km de longitud y un ancho variable de entre 80 y 230 km, que cruza México desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. En el contexto geodinámico, la CVTM se encuentra emplazada sobre la parte sur de la placa de Norteamérica, la cual es subducida por la placa de Cocos y por la micro-placa de Rivera a lo largo de la costa pacífica.

### 3.1.- Clima

Las condiciones climáticas que se presentan, corresponden con el clima templado húmedo, con precipitaciones en verano y otoño, con promedio anual de 727 mm, según datos registrados mensualmente por la estación meteorológica 21140 “Estación Chignahuapan” durante el periodo 1994 – 2017 (CONAGUA, 2016).

El periodo de lluvia o precipitaciones más altas se registran en los meses de junio a septiembre que va desde 217 a 322.5 mm respectivamente (Figura 6) (CONAGUA, 2016b).

La temperatura media oscila entre 12°C y 17°C, el tipo de clima presente en esta zona tiende desde un clima templado húmedo a semi-cálido, en estos climas son frecuentes las neblinas las cuales impiden el acceso directo de una concentración alta de humedad en la atmósfera, lo cual directamente minimiza las pérdidas de agua en la vegetación.

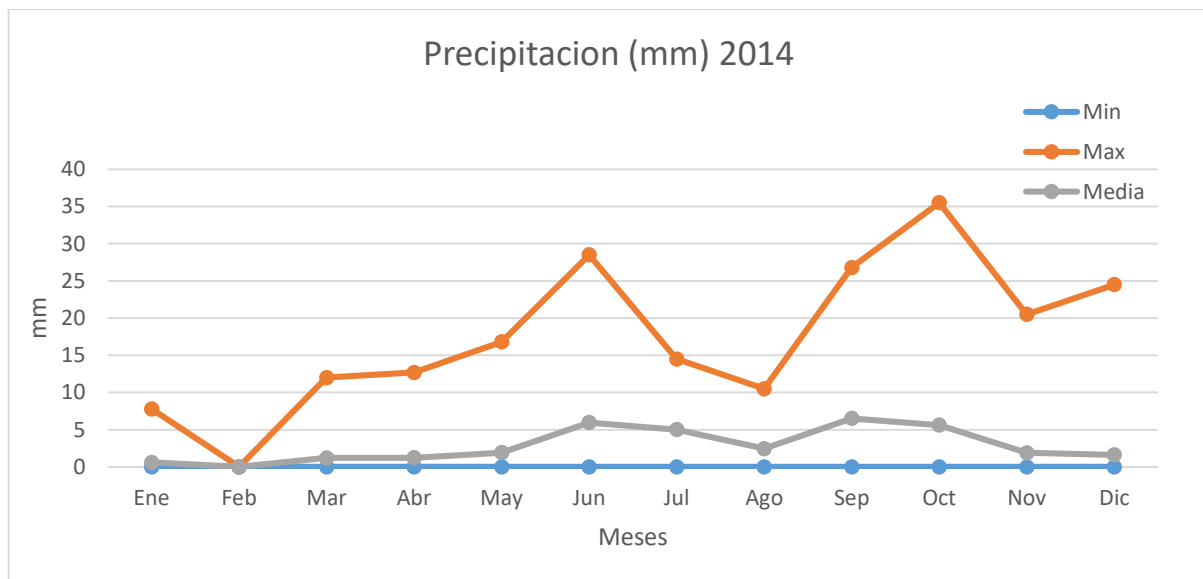


Figura 6. - Precipitación en relación a la zona de estudio. Chignahuapan, (CONAGUA, 2014).

### 3.2.- Uso de suelo y vegetación.

La vegetación tiene una función importante y relevante para la morfología fluvial, se considera que gracias a ella se logra la estabilización del terreno, ya sea a nivel de micro o macro escala, además de que funge como un retardador del flujo hídrico (Gonçalves et al., 2007).

Por otra parte, el suelo influye con gran importancia sobre el sistema hidrológico, principalmente en las corrientes o escurrimientos los cuales funcionan como transporte de material sólido, ya que dichas características físicas establecen el desarrollo de la

vegetación, la evapotranspiración, la erosión y transporte de sólidos son función de los diferentes tipos de suelos que se encuentran en las cuencas (Aranda, 1998).

Las características en las que crecen los bosques en dicha zona, se encuentran sobre sedimentos rocosos de origen sedimentario (calizas) y los suelos presentes en la zona están pocos desarrollados, pero también a la vez presentan buen contenido de materia orgánica tipo Litosol y Regosol, así como también presentan cierto grado de acidez, tipo Luvisol (Morales M., 2014a).

En la tabla II se presentan los tipos de vegetación y usos de suelo en la zona de Acoculco, Puebla, mismos que se describen a continuación:

Tabla II.- Tipos de vegetación existente en la zona de estudio. Tomada de (Morales M., 2014b).

MUNICIPIO	SUPERFICIE (HA)					
	TOTAL	AGRÍCOLA	PASTIZAL	BOSQUE	SELVA	MATORRAL
CHIGNAHUAPAN	67,030	45,254	1,862	19,914	0	0
ACATLÁN	43,217	28,719	607	13,891	0	0
HUAZOTEPEC	5,954	4,714	0	1,240	0	0

En la zona de estudio se presenta agricultura de temporal, que es una técnica de cultivo que depende del ciclo de precipitación y de la capacidad de retención de agua del suelo, por lo que no requiere riego. La duración de los cultivos es variable debido a que se pueden presentar cultivos desde anuales hasta permanentes (INEGI, 2012). La zona de exploración se compone principalmente por áreas dedicadas a la agricultura de temporal de cultivos anuales (Figura 7). La principal actividad económica es la agricultura, sin embargo, también existen otras actividades primarias tales como: ganadería bovina, porcina y ovina.



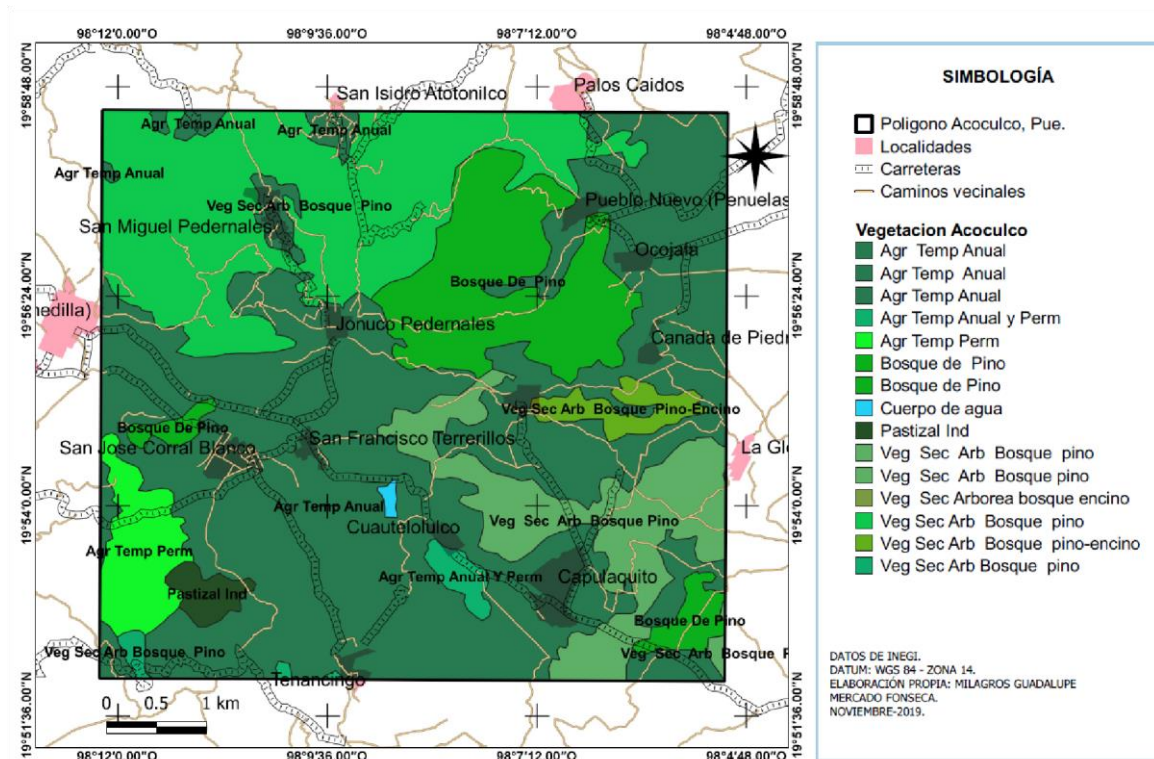


Figura 8.- Mapa de tipos de vegetación de la zona de Acapulco, Puebla.

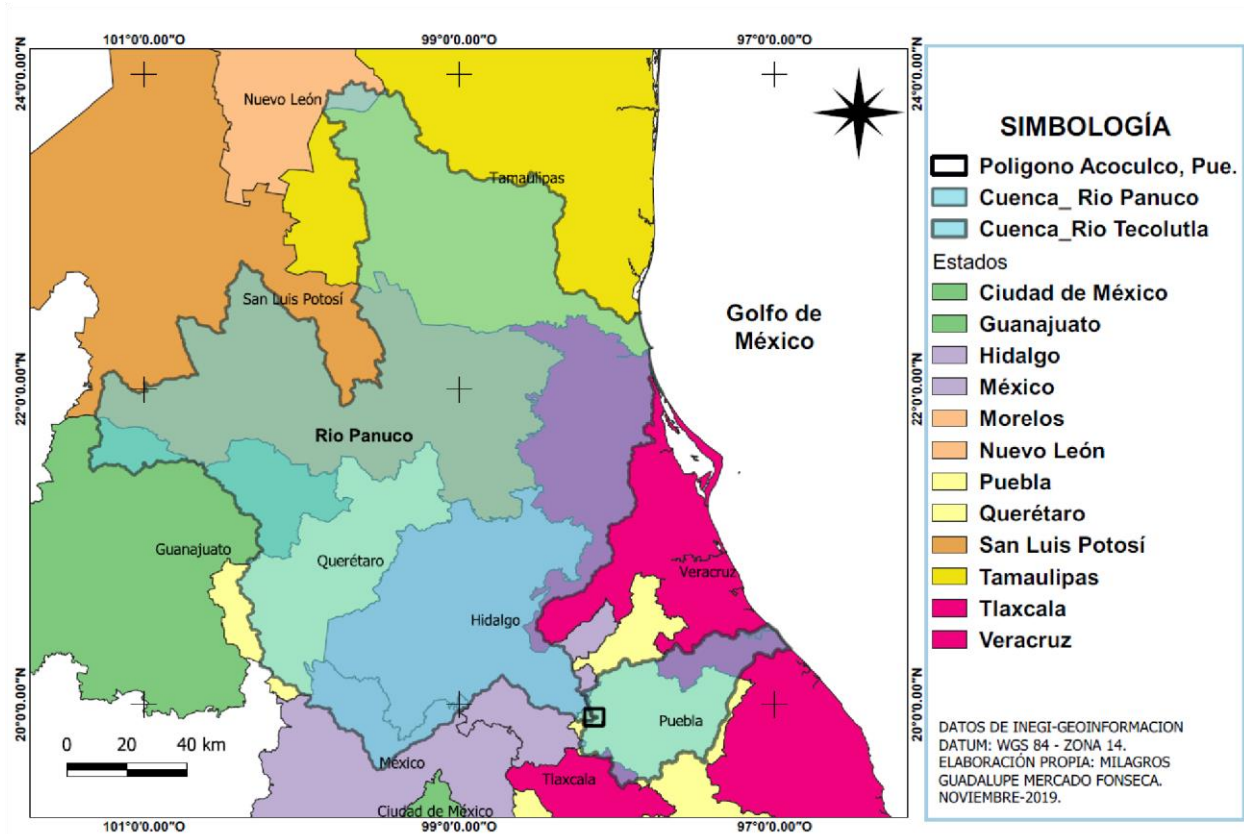
En esta área de estudio el bosque de coníferas representa la superficie donde existen bosques de pinos y se presenta vegetación alta (mayor a 30 m) (Verdugo, 2017). Este tipo de vegetación se compone por comunidades arbóreas que se encuentran en regiones templadas y semifrías con diferentes grados de humedad.

El bosque de mayor predominancia es el de género *Pinus* spp. Este tipo de vegetación domina una de las partes más altas en altitudes de 2,200 metros sobre el nivel del mar. Chignahuapan es el municipio con la mayor superficie de este tipo de vegetación (Morales M., 2014b).

**Vegetación secundaria.** Dentro de la zona de estudio también se presenta este tipo de vegetación, la cual se incrementa por el cambio de uso de suelo, sobre todo se encuentra en la zona de clima cálido-húmedo y semihúmedo. Aunque desde el punto de vista fisonómico se pueden diferenciar tres clases principales de vegetación secundaria (pastizal, matorral y acahual) en la zona solo se presenta el pastizal (Morales M., 2014b).

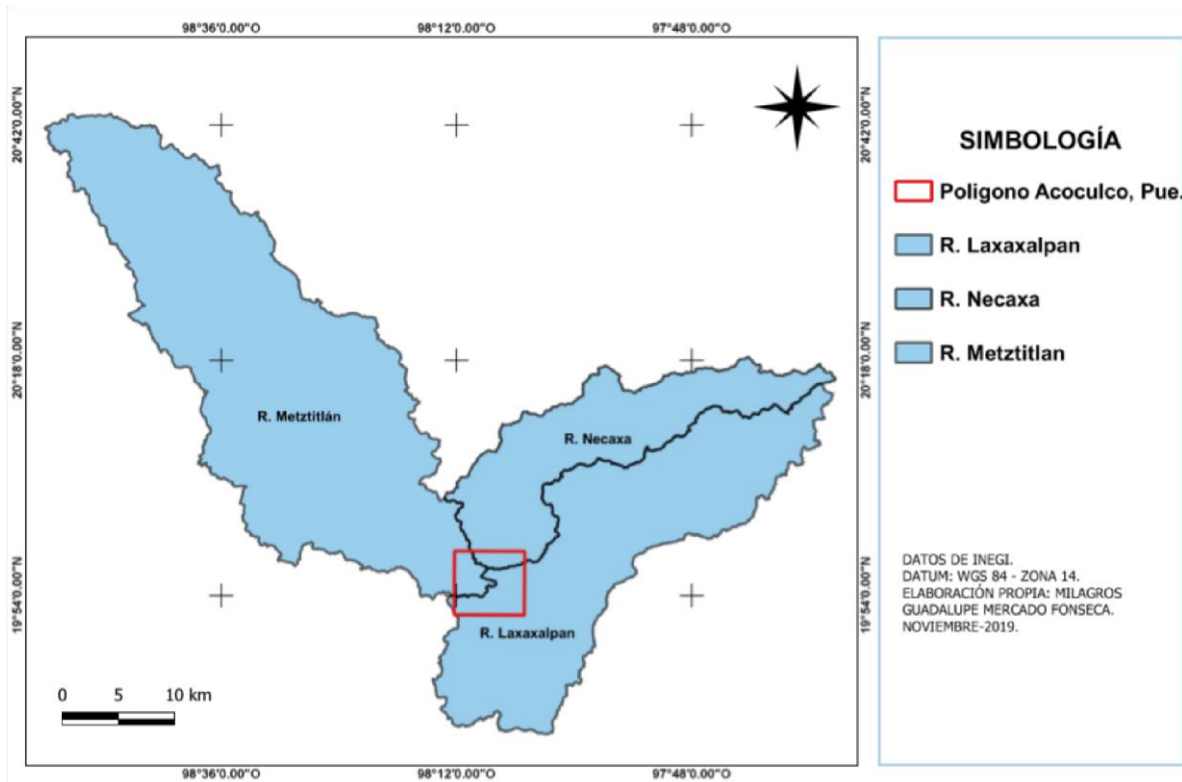
### 3.3.- Hidrología

El análisis a macro-escala de la figura 9 muestra la relación o conexión entre las cuencas Pánuco y cuenca Tecolutla que convergen en la zona de estudio.



**Figura 9.-** Mapa de visualización a macro-escala mostrando las cuencas conectadas con la zona de estudio Acozulco, Puebla.

La cuenca del Pánuco representa la seguridad hídrica para la población del país y por lo tanto es una de las corrientes de mayor importancia en México. Ocupa el cuarto lugar en superficie y el quinto en volumen de escurrimiento y da grandes beneficios a la región, por sus escurrimientos que si bien son abundantes han sido controlados mediante presas, para ser aprovechados con fines de riego en varios estados del país (Javier et al., 2015).



**Figura 10.-** Mapa de las subcuencas y sistema hidrológico de la zona de estudio.

La zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla se ubica en el parteaguas donde convergen tres subcuencas hidrológicas las cuales forman parte de dos regiones distintas como se muestra en la figura 10. En la región noroeste de la zona de estudio se encuentra la subcuenca Río Metztlán (RH26Dv), que forma parte de la región hidrológica Pánuco, así como también de la cuenca Río Moctezuma. Es de tipo endorreica o cerrada con una superficie de 2,821.42 km<sup>2</sup> y un máximo nivel de orden 6. Dentro del polígono de exploración se encuentran drenajes pluviales con tres tipos de órdenes (1, 2, 3) los cuales son de flujo intermitente. También es importante mencionar que de estas subcuencas existen dos microcuencas que entran al polígono de estudio.

Un sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales e incluso subterráneos se le conoce como red de drenaje de una cuenca, ya sea que los escurrimientos se encuentren presentes de manera temporal o permanente en respuesta de la precipitación. Dentro de ellos se identifica la formación y la rapidez del drenado de los escurrimientos ya sea normales o extraordinarios, por otro

lado, facilitan el conocimiento de las características físicas del suelo, así como también de la superficie de la cuenca (Aranda, 1998).

La zona de estudio forma parte de la Sierra Madre Oriental, siendo Puebla la zona donde dan inicio a los arroyos que originan el Río Tecolutla. En la zona se manifiestan cauces ubicados en cañones estrechos y profundos con grandes pendientes donde la cuenca del Tecolutla desemboca en el Golfo de México. Las diferentes corrientes principales toman los nombres de Zapata, río Coyuca, río Apulco y río Tecolutla (Javier et al., 2015).

La subcuenca R. Necaxa (RH27Bb) con una superficie de 900.78 km<sup>2</sup> es de tipo exorreica o abierta, con un máximo nivel de orden 5, de los cuales solamente se encuentran en el área de estudio los primeros dos tipos (1, 2) en ellos se encuentran flujos intermitentes y muy pocos perenes. Esta subcuenca forma parte de la región hidrológica Tuxpan-Nautla, cuenca del Río Tecolutla. Dentro de la subcuenca R. Necaxa solo una microcuenca forma parte del polígono de estudio.

Por último, se encuentra la subcuenca Laxaxalpan (RH27Bc) que cuenta con una superficie de 1,608.95 km<sup>2</sup>, es de tipo exorreica o abierta con un máximo nivel de orden 6, de los cuales solo los primeros tres se localizan en la zona de estudio (1, 2, 3). Los tipos de flujo en su mayoría son intermitentes, aunque en esta subcuenca se encuentra un mayor número de flujos perenes. En esta subcuenca entran tres microcuencas. Está también pertenece a la región hidrológica Tuxpan Nautla, cuenca del Río Tecolutla.

El polígono de la zona de estudio presenta dos tipos de flujos, los perennes que se encuentran en dos subcuencas, pero no tienen mayor relevancia, debido a que la mayoría (seis microcuencas) son flujos intermitentes, corrientes que fluyen sólo en respuesta directa a la precipitación.

### **3.4.- Recurso geotérmico**

La zona de Chignahuapan se encuentra en la parte de la Sierra Madre Oriental, donde se han encontrado tres fases de actividad volcánica. En las dos primeras fases se identificaron colapsos de caldera, que provocaron la creación de la Caldera de Tulancingo y la caldera de Acoculco, las cuales se fundaron por el ascenso del magma a través de

la concurrencia de dos fallas regionales con dirección Noroeste y Noreste (Verdugo, 2017; Lermo et al, 2009).

La Caldera Acoculco se encuentra dentro de la Caldera Tulancingo de 32 km de diámetro, la cual se encontraba activa hace 2.7 a 3 millones de años. La Caldera Acoculco tiene un diámetro de 18 km con un vulcanismo de hace 1.7 a 0.24 millones de años (López-Hernández et al., 2009 Gildardo y Gama, 2016).

En diferentes direcciones o áreas de la zona de estudio se han encontrado diversos elementos que forman parte de la geología (Figura 11), por ejemplo: en el N se derramaron las lavas más antiguas cuya composición es andesítica-basáltica, en el centro y E se acumularon lavas dacíticas de Cruz Colorada. En el S se encontraron lavas basálticas de Cuautelolulco el cual forma una gran mesa de hace 1.6 Ma, y el W se ubicaron los primeros domos riolíticos a los 1.7 Ma (Gildardo y Gama, 2016).

Aluvión. – Las características que presenta, son fragmentos de roca las cuales no están consolidadas y son depositados en corrientes fluviales (el cual hace referencia a corriente de agua tales como ríos, quebradas) los cuales fueron depositados en un tiempo geológico muy reciente (RACEFN, 1988).

Abanico aluvial. – Esto hace referencia a depósitos de sedimentos tales como gravas, arenas, las cuales se acumulan al pie de las serranías montañosas (RACEFN, 1988).

Andesita. - Es un tipo de roca volcánica el cual contiene un alto porcentaje de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), su porcentaje es 52% y el 63%. Por otro lado, también contiene minerales esenciales como son plagioclasas y piroxenos (RACEFN, 1988).

Basalto. - Por su lado también, es un tipo de roca volcánica cuyo contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) no es superior al 52%, por otro lado, contiene minerales esenciales como son: plagioclasa, piroxenos y olivino (RACEFN, 1988). Otra de las características es que conforman grandes extensiones de mesetas volcánicas, estas se ubican en fracciones del Noroeste y Sureste de la caldera de Acoculco (Verdugo, 2017).

Toba ácida. - Esta se caracteriza por ser una roca volcánica ligera y además porosa, la cual se forma por origen del depósito de polvo volcánico, ceniza o lapilli (RACEFN, 1988).

Riolitas. – Estas corresponden a una unidad de siete domos de composición las cuales fueron emplazadas mediante una traza anular en forma semi corona (Verdugo, 2017).

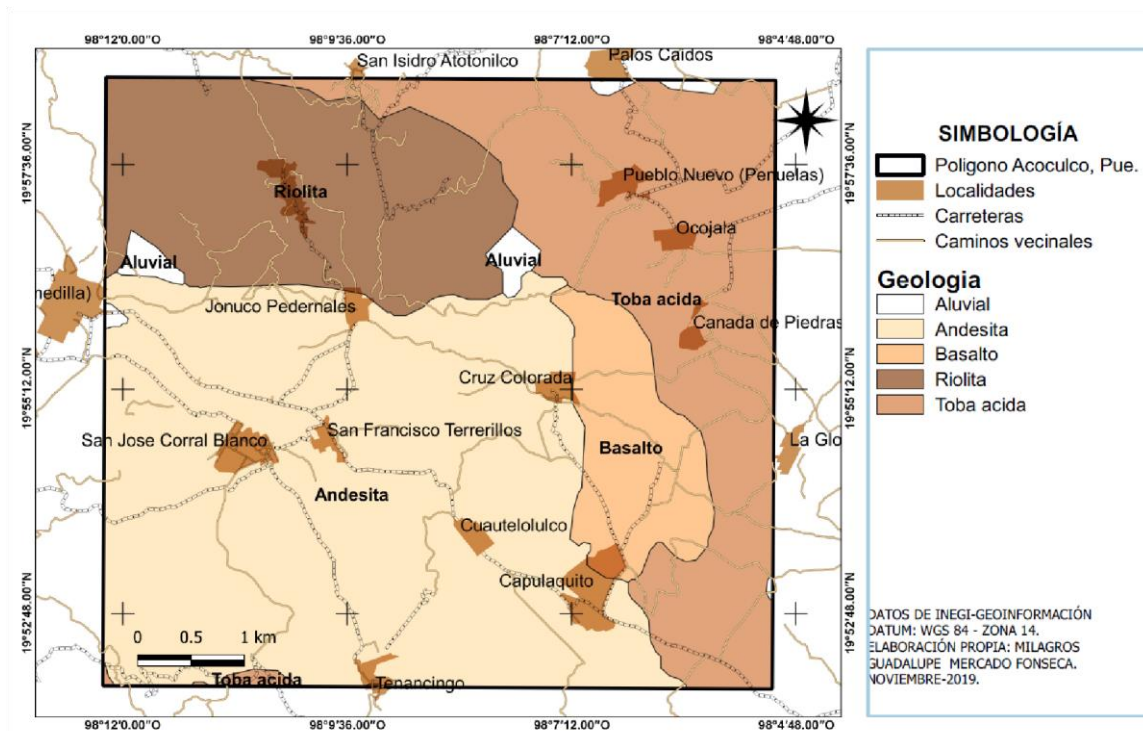


Figura 11.- Mapa de las características del subsuelo o de la corteza terrestre de la zona.

### 3.5.- Edafología

Los suelos predominantes en la zona son Andosol húmico, Andosol ocriceo, Feozem háplico, Luvisol ortico, Vertisol crómico, los cuales se encuentran en serranías orientales, ubicados en el noroeste del municipio de Chignahuapan (Morales M., 2014b).

**Andosol.** Este tipo de suelos presentan poco desarrollo, son originarios de cenizas volcánicas, mezclados con diversos materiales todos ellos derivados de volcanes, este tipo de suelos se distribuyen en grandes zonas donde hay actividad volcánica como lo es el eje Neovolcánico, una de las características en este tipo de suelos

es que cuentan con la disponibilidad o una capacidad elevada de retener o almacenar agua. Este tipo de suelos generalmente se encuentran en zonas montañosas y presentan una textura media. Se encuentran asociados a vegetación templada, específicamente por bosques de coníferas y encinos. Por otro lado, son suelos poco fértiles y sobre todo muy susceptibles a la erosión es por ello que se recomienda para uso único de forestal. En general son suelos que retienen fósforo, el cual es aprovechable por la vegetación (INEGI, 2000; Morales, 2014b).

**Feozem háplico (Fh).** – Estos suelos se definen por presentar un horizonte superficial, normalmente mayor de 25 cm de espesor, se encuentra enriquecido con materia orgánica (mayor a 1%) y por lo tanto también es rico en nutrientes, los más frecuentes son los siguientes: feozems háplicos, feozems lúvicos (INEGI, 2000). Este tipo de suelos cuentan con una textura media y una estabilidad dúrica. No son comunes en las áreas forestales. (Morales, 2014b). Presenta una amplia distribución encontrándose en la Llanura Costera del Golfo, en el eje Neovolcánico el cual se dirige hacia Chignahuapan, Oriental. Estos suelos cuentan con una fertilidad natural elevada y producen buenas cosechas, (INEGI, 2000).

**Luvisol órtico (Lo).** - Este tipo de suelos es fácil de encontrar debido a que se encuentra en todos climas y con diferentes tipos de vegetación. Se determina por tener una profundidad menor a 10 cm hasta conectar con la roca. Se logra ubicar en diferentes áreas tales como en laderas, barrancas y otras topoformas como lomeríos y planicies. Este tipo de suelos pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos y presentan una textura mediana y fina sobre todo estas características dependen del tipo de vegetación que los resguarda (Morales, 2014b). El papel que juega en la agricultura este tipo de suelos es que se condicionan a la presencia del agua, es por ello que también presenta peligro de erosión.

**Vertisol.** – En México y en el mundo entero, se han mencionado a los vertisoles como uno de los suelos más importantes debido a su alta fertilidad natural y la producción que ofrece para el crecimiento óptimo de diversas hortalizas, por otro lado, otra de las características importantes es contar con la capacidad de intercambio catiónico y una alta

retención de humedad. En este tipo de suelos también presentan una gran productividad en los mejores rendimientos para el maíz, trigo y sorgo (Sotelo et al., 2008).

En la figura 12 se presentan los tipos de suelo presentes en el área de estudio.

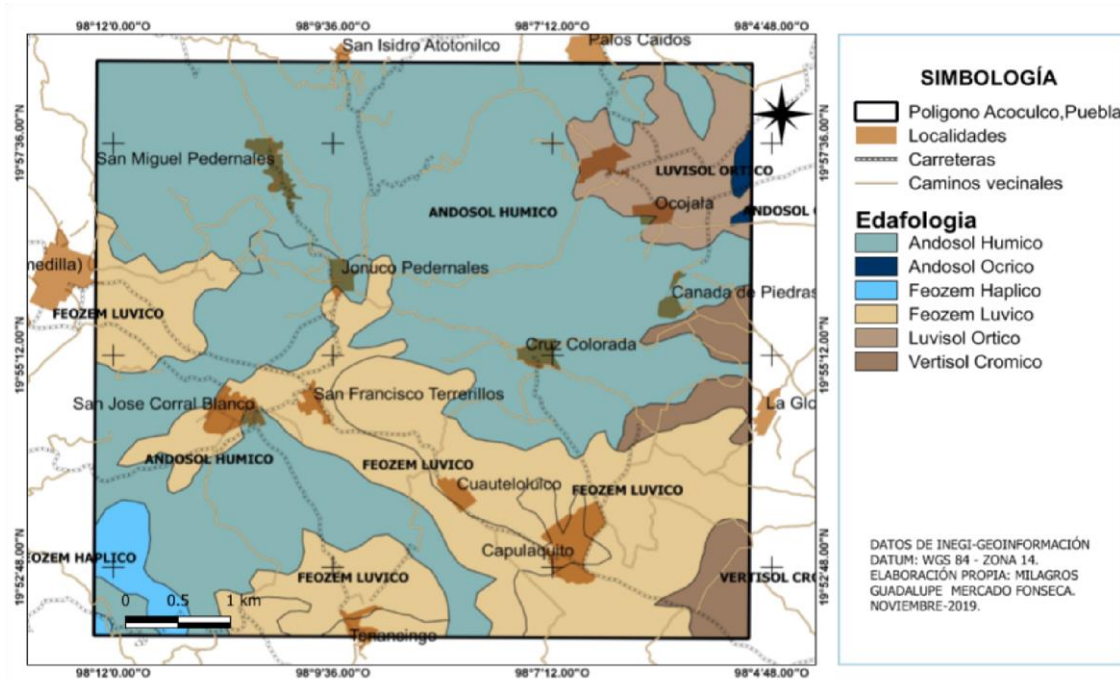


Figura 12.- Mapa edafológico de la zona de estudio.

#### 4.- METODOLOGÍA

Para la obtención y procesamiento de datos se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales sirven para la recolección de datos vectoriales de diversas variables tales como suelos, vegetación y geología, entre otras, hasta su almacenamiento y posteriormente la aplicación de información obtenida para la toma de decisiones. De esto se derivan mapas de algunas variables en los cuales se muestran las condiciones de la zona de estudio (World, 2004)

Para cumplir con los objetivos de la investigación fue necesario contar con herramientas tales como; el software de sistemas de información geográfica en especial con la herramienta de ILWIS para la delimitación de cuenca y para corroborar datos vectoriales de subcuencas, QGIS para la interpolación de datos de precipitación, Tmax, Tmin. También se utilizó la imagen de satélite LandSat 8, con el objetivo de trabajar los índices de agricultura, falso color, Land/water. Dichas herramientas permiten una mejor interpretación de datos.

#### **4.1.- Obtención de datos**

Para la determinación de las variables de vegetación, geología, tipos de suelos y cuencas, los datos se obtuvieron del portal de internet “portal de geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad SNIB” de INEGI, I de acceso libre, que permite la visualización y descarga de datos en formato vectorial a escala de 1: 50,000.

Se requirieron datos de las variables de precipitación, Tmax, Tmin, de cinco estaciones climatológicas con influencia indirecta a la zona de estudio.

Las estaciones utilizadas fueron; (1) 21210 Ahuazotepec, (2) 21140 Chignahuapan, (3) 13020 Presa Tezoyo, (4) 13085 San Lorenzo, (5) 21107 Zacatlán, definidas espacialmente por medio del método de los polígonos de Thiessen (Mijares, 1993), en el programa QGIS.

De dichas estaciones se obtuvieron datos de precipitación, continuos de ocho años, de plataformas oficiales tales como la CONAGUA las variables que se adquirieron fueron: valores diarios de precipitación y temperatura, para continuar con un análisis estadístico, el cual permite obtener promedios anuales, medias anuales. A partir de los datos diarios se logró obtener valores mensuales, anuales, así como también valores totales, medios, máximos y mínimos de cada de las estaciones en relación con la zona de estudio.

#### **4.2.- Procesamiento de datos**

Para el análisis geomorfológico de cada una de las subcuencas se utilizaron como guía los procedimientos propuestos por Campos-Aranda (1998), a los cuales se les dio seguimiento con las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica y la búsqueda de datos disponibles de INEGI, para la identificación del cauce principal se realizó el análisis espacial con el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), el cual presenta una resolución de 15m x 15m y se encuentra disponible en la plataforma de INEGI.

Una vez realizada la identificación de las condiciones ambientales, se llevó a cabo la selección de modelos digitales, que forman parte de un sistema de información geográfica, (SIG) con los cuales se lograron obtener resultados como, escurrimientos

principales, acumulación de flujo, dirección de flujo, como también delimitación de cada una de las subcuencas, microcuencas (Tabla III).

Tabla III.- Representa los datos de descarga de cada una de las subcuencas.

<b>Cuenca</b>	<b>Nombre subcuenca</b>	<b>Clave</b>	<b>Superficie DEM</b>
Pánuco	Metztitlan	RH26Dv	15m x 15m
Tecolutla	Necaxa	RH27Bb	15m x 15m
Tecolutla	Laxaxalpan	RH27Bc	15m x 15m

Para el manejo de datos, se utilizaron diferentes modelos de "Continuo de Elevaciones Mexicano CEM", 15 m en formato de 1:50.000, el proceso realizado fue para cada una de las subcuencas que entran en la zona de estudio, la cual conforma un área de 150 km<sup>2</sup>.

A continuación, se describe el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), el cual es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y). Plataforma de INEGI, 2019.

Por lo tanto, muestra cada uno de los modelos de elevación digital que fueron utilizados para cada una de las subcuencas.

1.-Región hidrográfica Pánuco, - cuenca río Moctezuma y sub-cuenca R. Metztitlan.

Como referencia se trabajó con los siguientes modelos de continuo de elevaciones mexicano (CEM) (E14B12, E14B13, E14B14, F14D61, F14D62, F14D71, F14D72, F14D73, F14D81, F14D82).

2.-Región Hidrográfica Tuxpan-Nautla, cuenca río Tecolutla, subcuenca R. Necaxa

Como referencia se trabajó con los siguientes modelos de elevación digital (CEM) (E14B13, E14B14, F14D74, F14D75, F14D83, F14D84, F14D85).

3.- Región Hidrográfica Tuxpan-Nautla, cuenca río Tecolutla, subcuenca R. Laxaxalpan. Se obtuvieron los siguientes modelos de elevación digital (CEM) (E14B13, E14B14, E14B15, E14B16, E14B23, E14B24, E14B25, E14B26, F14D74, F14D75, F14D76, F14D83, F14D84, F14D85, F14D86).

Para el tratado de cada elemento se realizó el mismo procedimiento para los tres afluentes hídricos superficiales, los cuales convergen en la zona de estudio, cada componente se analizó desde el punto de vista hidrológico.

El ajuste de datos fue en el software Sistema de Información Integrado para el manejo de Tierras y Aguas (ILWIS 3.3). Dentro del software mencionado anteriormente se logró la obtención del orden de drenaje, polígono de cada una de las sub-cuencas y así como también microcuencas de cada una de las mencionadas anteriormente, por lo tanto, se cuenta con una tabla de atributos de cada una de las subcuencas.

Se utilizó la metodología del método de polígono de Thiessen que se usa para la determinación de las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas y adquirir la precipitación en relación con la zona de estudio (Tabla IV).

Tabla IV.- Se observa la fórmula que se utilizó para la obtención de los polígonos de Thiessen

$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum A_i}$	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Conectar las estaciones contiguas.</li><li>✓ Trazar mediatrices perpendiculares y prolongadas.</li><li>✓ Obtención de polígonos.</li><li>✓ Cálculo de área de influencia.</li></ul>
<p>Pi= Precipitación puntual de la estación i. Ai= Área de influencia de la estancia i.</p>	

En la figura 20, se presenta la geolocalización de las estaciones climatológicas de cada una de las subcuencas que convergen en la zona de estudio, en lo cual se logra observar que las distribuciones de las estaciones no son homogéneas, observando que dentro de la zona de estudio solo hay una, la cual en su revisión se encuentra sin función, es por ello que se tomaron datos de estaciones lo más cerca posible a la zona de estudio, cabe mencionar que hay estaciones muy cerca de la zona pero se encuentran sin función y/o sin uso. Es por ello que se tomaron las estaciones que se encuentran en funcionamiento y con datos continuos, por lo tanto solo se logró obtener datos de cinco estaciones con ocho años de continuidad, de los cuales se logró obtener datos aproximados de precipitación mediante el proceso de interpolación de datos por el programa QGIS, con el objetivo de estimar valores desconocidos y obtener un aproximado de la precipitación de la zona de estudio.

El coeficiente de compacidad (Cc) indica si una cuenca es circular lo que se asocia a las velocidades que pueden tener los cauces. Este está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica, este parámetro tiene como límite inferior la unidad. Entre más cercano sea a

uno indica que la cuenca es circular: conforme aumenta indica una forma alargada o asimétrica (Campos- Aranda, 1992).

$$Cc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Dónde:

Cc = Coeficiente de compacidad (adimensional).

P = Perímetro de la cuenca (km).

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

La relación de elongación (Re) definida por (Schumm, 1956) indica si existen fuertes relieves y pendientes pronunciadas del terreno. Entre más cercano sea la 1 indica relieves bajos (Campos- Aranda, 1992). La longitud, L, de la cuenca puede ser definida por la distancia horizontal del río principal entre un punto y aguas abajo (estación de aforo) y otro punto de aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca. Esta relación se encuentra expresada en la siguiente ecuación.

$$Re = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{Lc}$$

Dónde:

Relación de elongación (adimensional).

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

Lc = Longitud de la cuenca (km).

### **4.3.- Análisis estadístico**

Se realizó un análisis estadístico puntual, el cual permitió la obtención de diversos resultados de las variables de temperatura y precipitación, estos con los datos que permitieron conocer la zona de estudio bajo estas variables.

Se calcularon mediante el paquete de office Excel 2016, los valores mensuales y anuales, valor mínimo, valor máximo, media, valores anuales (mencionado que este último solo fue para el caso de precipitación).

La obtención de los datos mencionados anteriormente fue obtenida de las estaciones climatológicas de Conagua.

Totales diarios de precipitación incluyendo valores de 0 (cero).

Total, de precipitaciones mensuales.

Total, de precipitación anual.

Temperatura media diaria, mensual y anual.

Temperatura máxima diaria, mensual y anual.

Temperatura mínima diaria, mensual y anual.

Para la obtención de los datos mencionados, se utilizó la herramienta de interpolación por medio del programa QGIS 3.14, con el objetivo de conocer los valores estimados de media y anual de precipitación de la zona de estudio.

#### 4.4.- Caracterización de la hidrología

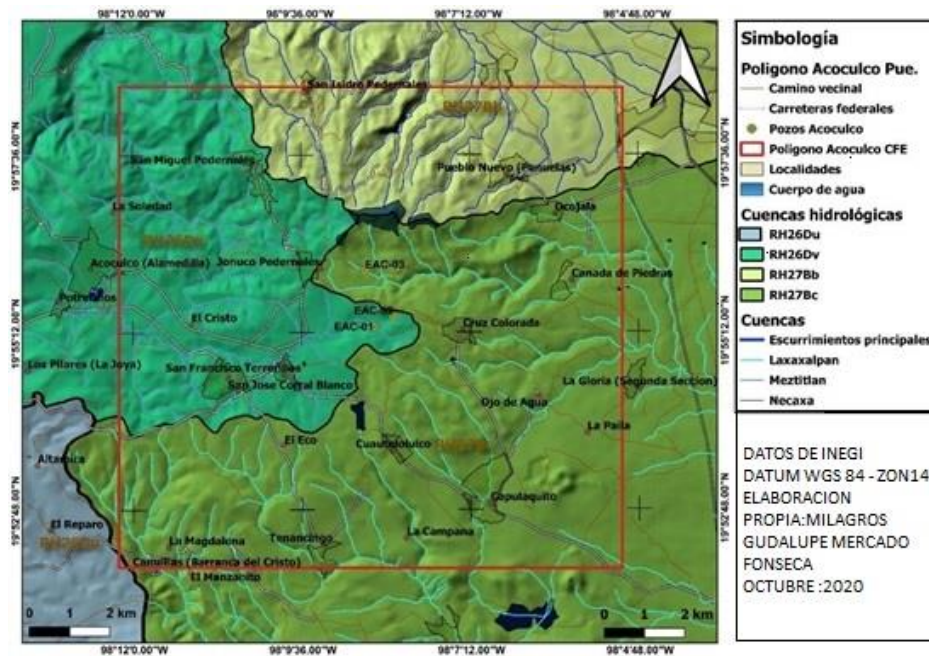
De acuerdo con INEGI, el territorio municipal de Chignahuapan se encuentra dentro de tres regiones hidrológicas: RH18 Balsas, RH26 Pánuco y RH27 Tuxpan- Nautla. En relación a la primera región hidrológica, la mayor parte del territorio municipal pertenece a la cuenca Tecolutla y a las Subcuencas Necaxa, Laxaxalpan, Tecuatepec y Apulco (Tabla 1).

Tabla V.- Muestra la superficie de cada de las subcuencas.

REGIÓN (CLAVE / NOMBRE)	CUENCA (CLAVE / NOMBRE)	SUBCUENCA, CLAVE, NOMBRE	% DE LA SUPERFICIE MUNICIPAL
<b>RH27 TUXPAN- NAUTLA</b>	B R. Tecolutla	b R. Necaxa	1.93
		c R. Laxaxalpan	25.07
		d R. Tecuatepec	0.82
		e R. Apulco	0.16
<b>RH26 PANUCO</b>	D R. Moctezuma		11.15

		u L. Tuchac y Tecocomulco	
		v R. Metztlán	9.33
<b>RH19 BALSAS</b>	A R. Atoyac	j R. Alseseca	1.54
<b>FUENTE: INEGI. CARTA HIDROLÓGICA DE AGUAS SUPERFICIALES, 1:250 000</b>			

Cómo cuenca predominante sobre el área de estudio, es Río Tecolutla, perteneciente a la región hidrológica de la cuenca Tuxpan-Nautla (RH27), ocupando el 77.98% del municipio de Chignahuapan. Presenta una corriente de agua perenne que comparte Chignahuapan, mientras que la cuenca del río Moctezuma, de la región hidrológica de la cuenca Pánuco (RH26), abarca el 22.41%. Y solo una pequeña porción del territorio, representada por el 1.54%, está dentro de la subcuenca del río Atoyac de la región hidrológica de la cuenca del Balsas (RH18) cuyas vertientes desembocan en el Golfo de México, estos se caracterizan por sus ríos jóvenes y escabrosos (Figura 1).



**Figura 13.-** Subcuencas que convergen con el polígono de la CFE, Acoaculco Puebla.

Para la generación de mapas se utilizó el método de la distancia inversa ponderada (IDW), proyección universal transversal de Mercator (UTM), zona 14, elipsoide y Datum horizontal Sistema Geodésico Mundial (WGS84). La interpolación es un proceso

por el cual se define un valor en un punto cualquiera a partir de los valores conocidos en algunos puntos dados la técnica; para rellenar las depresiones en los cálculos de los drenajes de escorrentías de las cuencas fue la de Wang Liu (Wang, 2006) este algoritmo permite el relleno de vacíos y depresiones de la imagen raster. Para variables continuas, el valor del punto variable, resulta de una suma de valores ponderados de las variables en los puntos conocidos. Estudios realizados por (SEMARNAT, 2013), mencionan que, por el factor gravedad, los elementos que se encuentran en cuenca arriba podrán ser arrastrados superficialmente a cuenca baja, lo cual permite un vínculo directo entre cuenca alta, media y baja.

#### **4.5.- Caracterización de la vegetación**

El SIG se ha convertido en una herramienta de análisis y visualización de datos espaciales de rutina, y en la actualidad se usa ampliamente en aplicaciones como: mapeo del uso del suelo para la planificación urbana, el manejo forestal, información del catastro, manejo de recursos naturales, análisis de rutas de transporte, tráfico, desplazamientos, análisis económico espacial, migración, entre otros. Nuestro principal insumo geográfico estadístico fueron las Series III y VI de INEGI, utilizamos las capas de información de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1: 250,000 con las cuales se realizó una superposición de mapas y cruzamiento de la información de ambas capas mediante el programa QGIS Desktop 3.14.0. . La clasificación que se utilizó es la de CONAFOR (2018) adaptada por INEGI (2009; 2014), la cual se utilizó dentro del proyecto internacional “Las Cuentas Experimentales de los Ecosistemas” propuesto en el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica -SEEA por sus siglas en inglés- (UN, 2016).

### **5.- RESULTADOS**

#### **5.1- Condiciones bióticas y abióticas asociadas a las características hidrológicas del sitio**

Como factores bióticos que forman parte del área de estudio de Acoculco, Puebla se lograron identificar, la existencia de vegetación secundaria de arbustos de bosque de pino, así como el tipo de agricultura que se desarrolla de manera permanente y anual.

Dentro de los componentes abióticos se encontró la conexión de tres subcuencas, las cuales a su vez toman una importancia vital, debido al sistema hídrico de la zona. En este sitio, se llevan a cabo diferentes actividades, por ejemplo la agricultura que se lleva a cabo de manera temporal cuando la precipitación se hace presente en la zona de estudio.

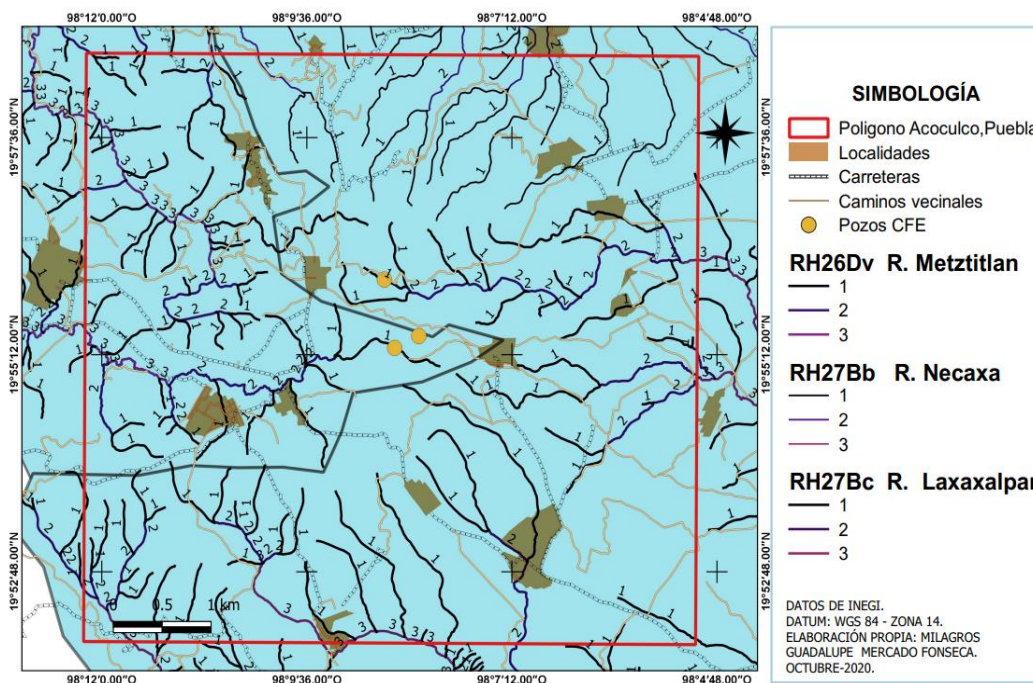
También se encontraron seis diferentes tipos de suelos, los de mayor cobertura en el territorio son los andosoles que son formados a partir de cenizas volcánicas, en particular el andosol húmico es rico en materia orgánica y presentan un color oscuro (INEGI 2000), este tipo de suelos se encuentra presente en el área donde se lleva cabo la agricultura.

## **5.2.- Actividades económicas en la zona**

Las principales actividades socioeconómicas son: agricultura, pesca, turismo y actividades forestales (Graf y Bauche, 2015). Se logran identificar los principales problemas que se presentan a partir de las alteraciones del entorno como la deforestación, y el cambio del tipo de uso de suelos. (Tapia Silva, 2017).

**Geotermia.** – En la figura 14, se logra visualizar las áreas donde se han realizado perforaciones en búsqueda del recurso geotérmico, dichas perforaciones se

encuentran entre las cuencas que convergen en la zona de estudio.



**Figura 14.-**Pozos exploratorios y escorrentías superficiales en la zona de estudio.

En la figura 14, se logra identificar tres pozos, pero solo dos de ellos se ha llevado a cabo su perforación, el tercer pozo se encuentra bajo estudios donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE) dirigió un permiso a SEMARNAT para llevar a cabo la perforación de dicho pozo, se encuentra en la zona de Alcaparrosa, donde se ha logra ver el accionar de los gases geotérmicos con el agua que se almacena debido a los escurrimientos superficiales.

También las visitas a campo durante esta investigación permitieron ver la parte socio-cultural que esto representa para la zona rural, permanentemente existe charcos de agua, que hacen está conexión con los gases geotérmicos, donde las personas hacen uso de estos, como tratamientos o baños naturales para cualquier tipo de enfermedad o dolor, dejando ellos una cruz de madera como fuente de agradecimiento por los recursos que utilizan para ser sanados.



**Figura 15.-** Actividad que muestra la cultura de la sociedad en la zona geotérmica.

**Minería.** – Dentro de la zona de estudio se ha identificado la actividad minera, donde particularmente se lleva a cabo la minería de tipo a cielo abierto (figura 16), afectando puntualmente los sistemas de orden (1, 2) de la subcuenca Metztlán, causando cambios sobre la superficie terrestre y a su vez grandes modificaciones al recorrido natural que realiza el recurso hídrico hasta llegar a su punto final figura 17.

En la figura 16 se logra apreciar que en la zona de estudio se lleva a cabo la actividad minera, fotografías durante el recorrido de campo.



**Figura 16.-** Actividad minera en la zona de estudio.

La minería a cielo abierto se caracteriza por los grandes volúmenes de materiales que se deben mover (Herbert, 2006).

Este tipo de minería es muy discutida a nivel mundial, debido a que se realiza por medio de explosiones y excavaciones para la obtención de metal, el cual se encuentra oculto, esto conlleva a una la producción de grandes impactos ambientales (Bellotti, 2011). Esta actividad consiste en remover la capa superficial de la tierra la cual quiere decir que no se lleva cabo en galerías subterráneas, por lo tanto se realiza en la superficie terrestre para encontrar depósitos de mineral de baja calidad, aunque hoy en día existen grandes equipos (maquinaria), inclusive de explosivos los cuales permiten remover grandes volúmenes de material, lo cual llega a crear grandes cráteres que pueden llegar a ocupar un territorio de 100 hectáreas y generalmente alcanzan entre 200 a 800 m de profundidad (Bellotti, 2011).

El mismo autor (Bellotti, 2011), menciona que este tipo de minería a cielo abierto produce una gran alteración significativa de la corteza, menciona que el efecto es agresivo en diferentes ámbitos como el ambiental, social y cultural. Por lo tanto, no existe ninguna otra actividad industrial que resulte más agresiva y devastadora que la minería superficial, es decir la actividad de minería a cielo abierto.

Por otro lado, Salinas y colaboradores (2017) mencionan que las actividades para los estudios topográficos, geológicos, geofísicos, la búsqueda de pozos de reconocimientos, así como también la toma de muestras, pueden llegar a producir impactos ambientales durante la fase de exploración; debido que para ello se tienen que construir caminos de acceso al área.

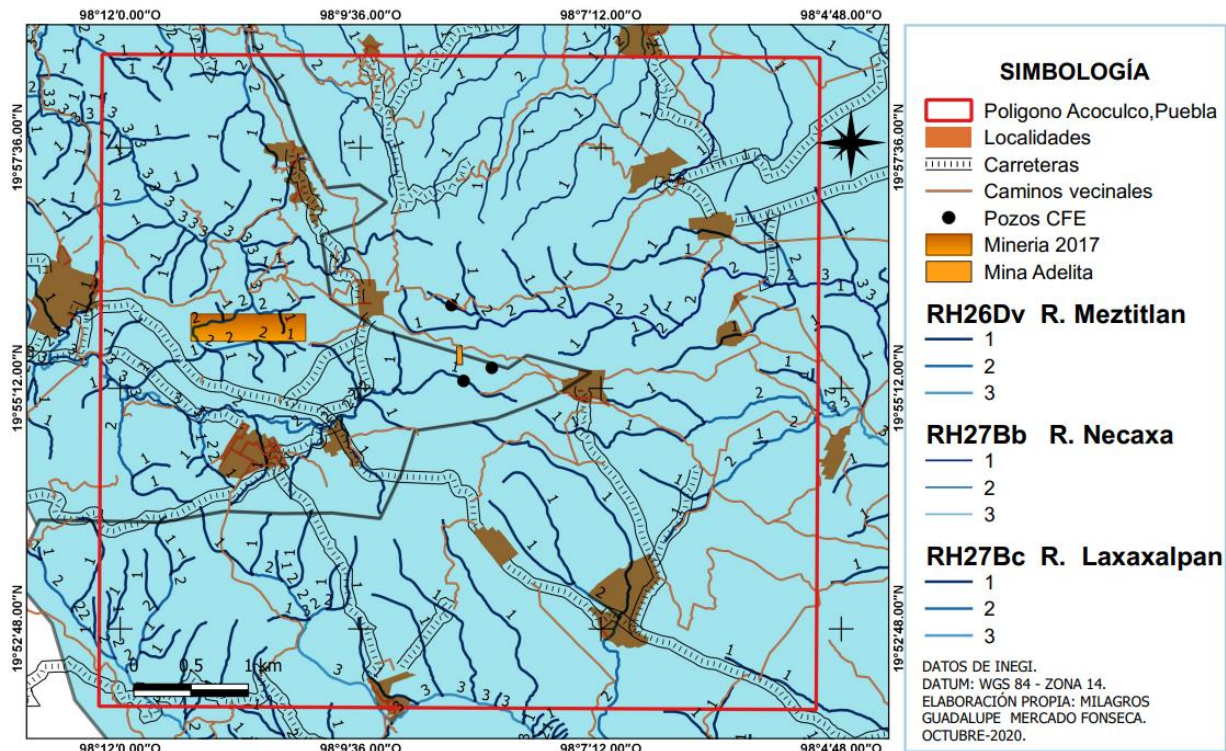


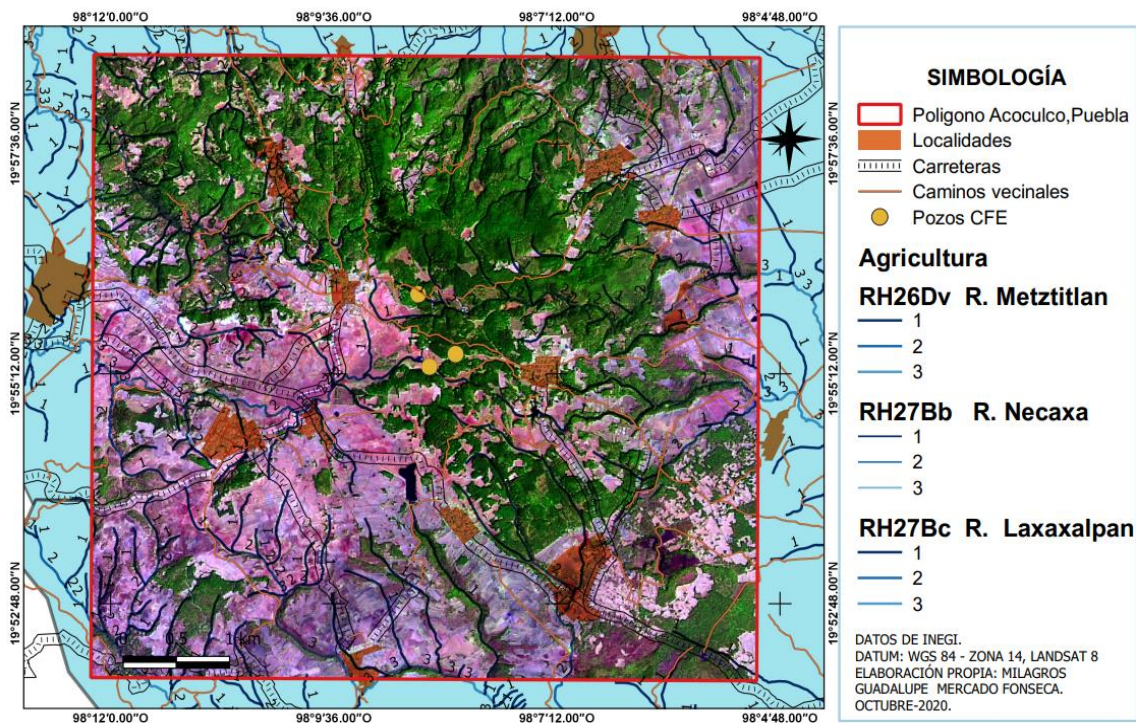
Figura 17.- Actividad minera dentro de la zona de estudio

**Ganadería.-** Se dice que la ganadería es una actividad importante económicamente para el sector primario. Su importancia radica en tres aspectos fundamentales por ejemplo se menciona que, México es un país con una gran vocación ganadera ya que dicha actividad es de 109.8 millones de hectáreas (56% en superficie nacional) y en la mayor parte se lleva a cabo la ganadería en categoría extensiva (Gonzalo-Halffter, 2018).

Dentro del municipio de Chignahuapan, Puebla, en donde se localiza la zona de estudio, está descrita la actividad principal de ganadería que a continuación se describe. Dentro de la búsqueda bibliográfica se encontró que, 79 familias son productoras de ganado ovino, dichas investigaciones muestran que para el municipio de Chignahuapan, la ganadería ovina constituye una de las actividades económicas más importantes para ser una fuente de ingresos y contribuir a la alimentación. Es importante mencionar que este municipio posee un potencial, para convertirse en una actividad económica

fundamental que aporta para el desarrollo rural sustentable de la zona (Hernández, 2008).

**Agricultura.** En la figura 18 se presentan las actividades agrícolas que se realizan en la zona de estudio, como son los campos agrícolas dando apertura a producción de maíz, cebada, dichas actividades se desarrollan en las tres subcuencas que conectan en la zona, y se lleva a cabo en la temporada de lluvia, las cuales se designan como actividades temporales. También se desarrollan otras actividades tales como las forestales, en donde algunos ejidos reciben pago por servicios ambientales. Estas áreas están presentes entre las subcuencas R. Metztlán y R. Laxaxalpan, dichas actividades son fundamentales para los sistemas de orden de las subcuencas y de todo el sistema hídrico de cada una de las subcuencas.



**Figura 18.- Se muestra en color rosa la agricultura que se lleva a cabo en la zona de estudio.**

Tabla VI. - Muestra las pérdidas y ganancias de las actividades de la zona de estudio.

<b>Tipo de agricultura</b>	<b>Pérdida %</b>	<b>Ganancia %</b>
<b>Agricultura temporal anual</b>	-5.41 %	
<b>Agricultura temporal anual y permanente</b>	-17.81 %	
<b>Agricultura de temporal permanente</b>		62.69 %
<b>Bosque de Pino</b>	-66.26 %	
<b>Pastizal Inducido</b>	-37.20 %	
<b>Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino</b>		491.03 %
<b>Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino - encino</b>		0.95 %

La tabla VI, muestra un resumen del Anexo de las series I y VI, así mismo las figuras 19 y 20 fueron obtenidas de la plataforma geo-portal de CONABIO con el objetivo de analizar las pérdidas y ganancias de las diferentes actividades que se llevan a cabo en la zona de estudio, y como resultado se obtuvo lo siguiente.

En la descripción de agricultura temporal anual, se obtuvo un 5.41% de pérdida de esta actividad, como también se ha encontrado una pérdida de 17.81% en la actividad de agricultura de temporal anual y permanente. Sin embargo, los resultados muestran un incremento de agricultura de temporal permanente revela un 62.69%.

Una de las actividades con mayor pérdida es el bosque de pino con un 66.26%, estas pérdidas que se generan se encuentran estrechamente relacionadas con el ciclo hidrológico, ya que al ser parte de un ciclo ocasiona grandes problemas ambientales para el recorrido que realiza el recurso hídrico, por ejemplo al tener pérdidas de vegetación, se produce una erosión directa al suelo, así como también el cambio de dirección de flujo, y con ello deslizamientos que a su paso transportan residuos a los ríos ocasionando grandes problemas, por otra parte, dentro de esta tabla también se logra apreciar la pérdida en pastizal inducido con un 37.20%.

Algo similar ocurre con el dinamismo de la vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino, muestra un incremento 491.03%, este incremento se debe a las actividades forestales que se llevan a cabo. Finalmente se obtuvo un 0.95% de vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino, por lo tanto, según los resultados obtenidos mediante las series analizadas, como también los mapas; se determinó que hay variabilidad de las actividades ya que algunas muestran incrementos y en otras grandes pérdidas de las actividades agrícolas, de manera que, se puede estipular que hay cambios en el ciclo hidrológico y por ende en las corrientes tributarias que realiza el recorrido del agua.

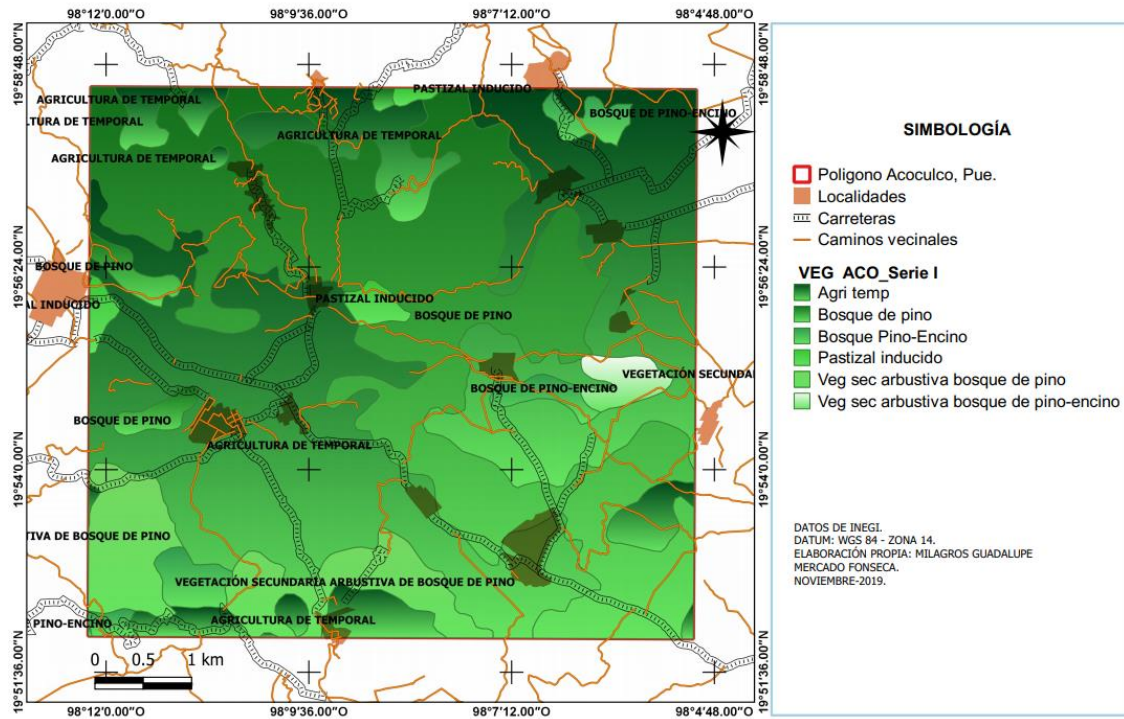


Fig. 19.- Muestra la vegetación de la zona de estudio, por medio de la serie I

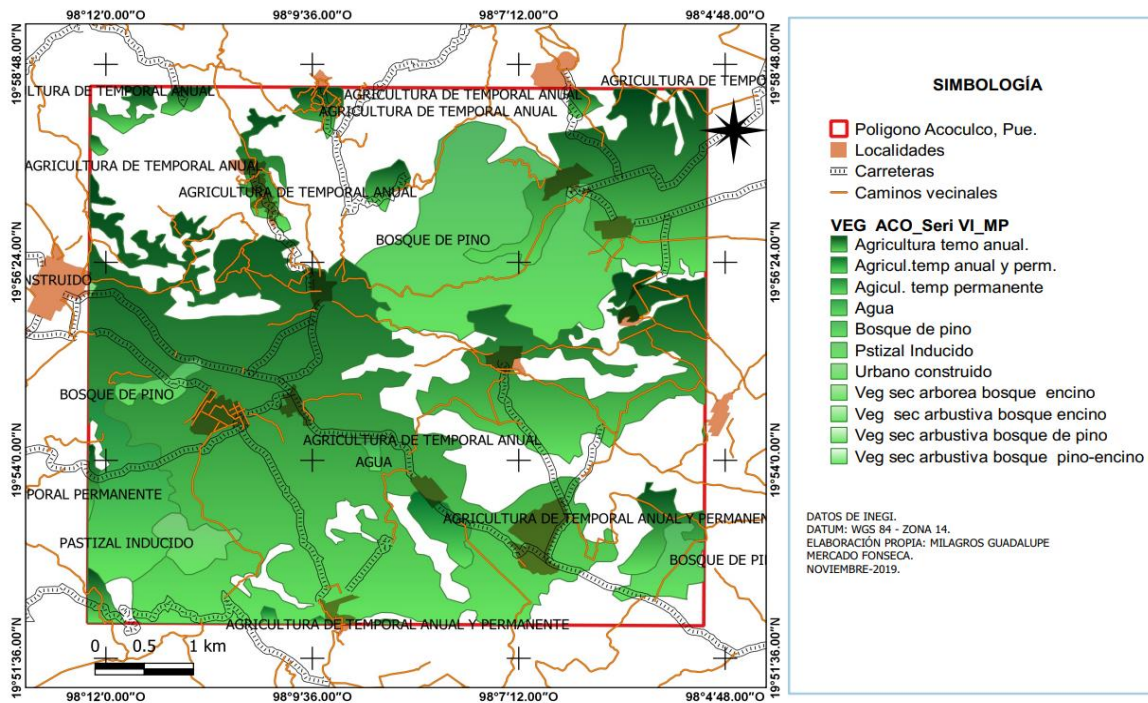


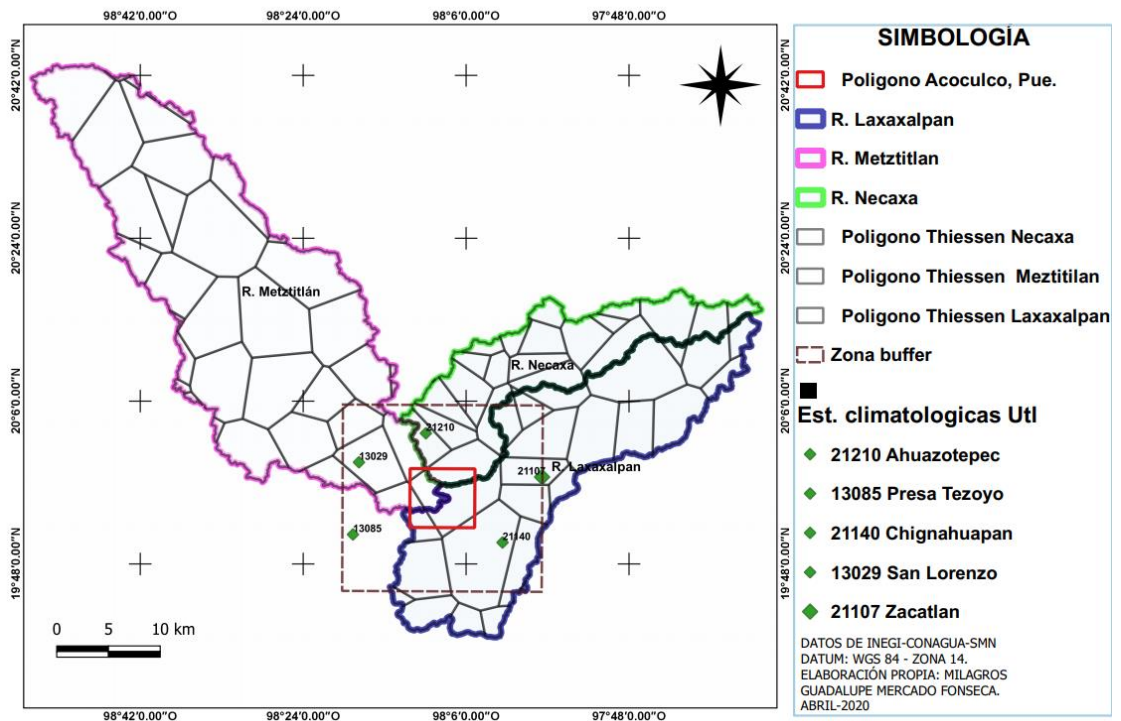
Figura 20.- Se muestran los tipos de vegetación en la zona de estudio, de la serie VI



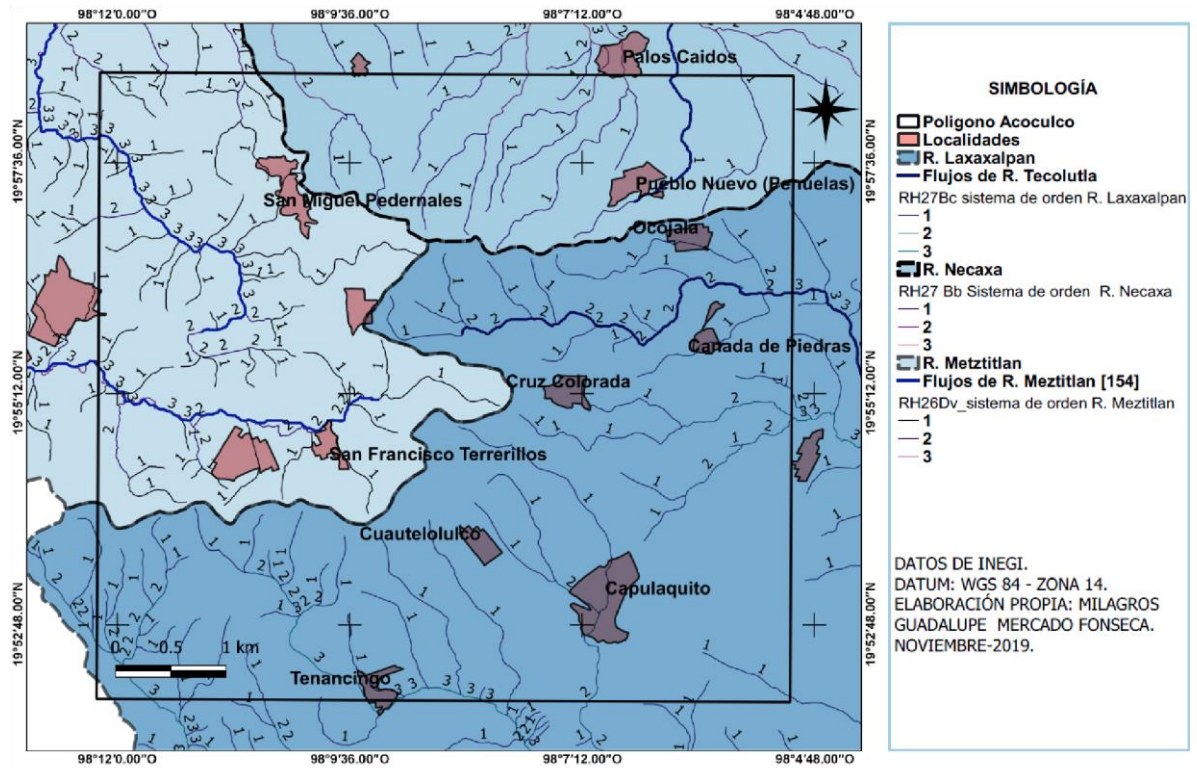
## 5.4.- Caracterización de la hidrología

Campos Aranda en el 1998, menciona que, no toda la precipitación tiene una llegada al terreno, ya que parte de ella se evapora durante su caída siendo esta variable parte del ciclo hidrológico, como también suele ser retenida por medio de la interceptación, por la vegetación, pero en poco tiempo regresa en forma de vapor.

Una vez identificado cada una de las estaciones, se tomaron datos de las estaciones que se muestran en el siguiente mapa, las estaciones son las siguientes; Ahuazotepec (21210), Chignahuapan (21140), Presa Tezoyo (13085), San Lorenzo (13029) y Zacatlán (21107).

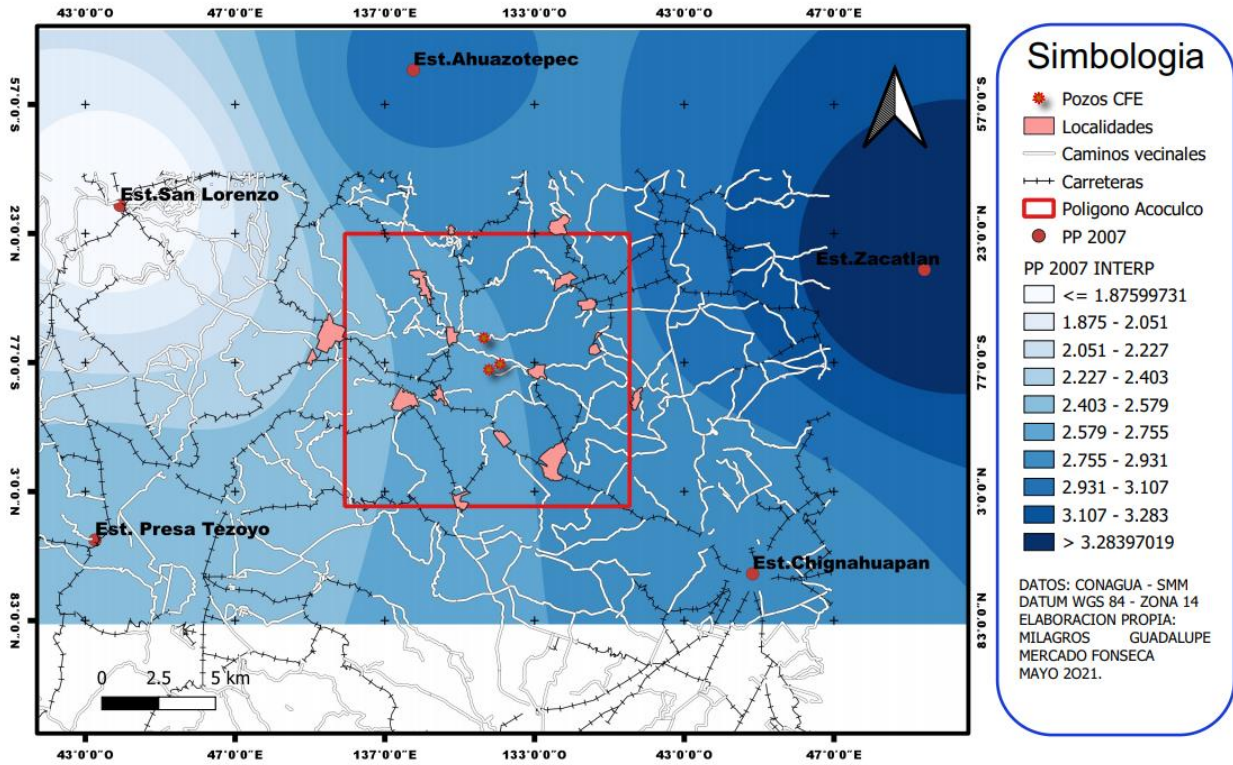


**Figura 22.-** Estaciones de las cuales se obtuvieron datos para la realización del análisis de precipitación, así como también la zona buffer.



**Figura 23.-** Se muestran las localidades que se encuentran en la zona de estudio, así como también las posibles interacciones con la hidrología superficial de la zona.

La precipitación promedio anual de la zona de estudio, con base a los resultados que se obtuvieron por medio de interpolación de polígono de Thiessen se muestra en los mapas de la precipitación media anual, obtenida del análisis de datos los años del 2007 al 2014, por ser el único periodo con datos continuos (Figuras 24 a 39).



**Figura 24.-** Muestra la Precipitación del año 2007.

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2007, expresando como resultado entre 2.51 mm a 2.82 mm en la zona de estudio Acoaculco, Puebla.

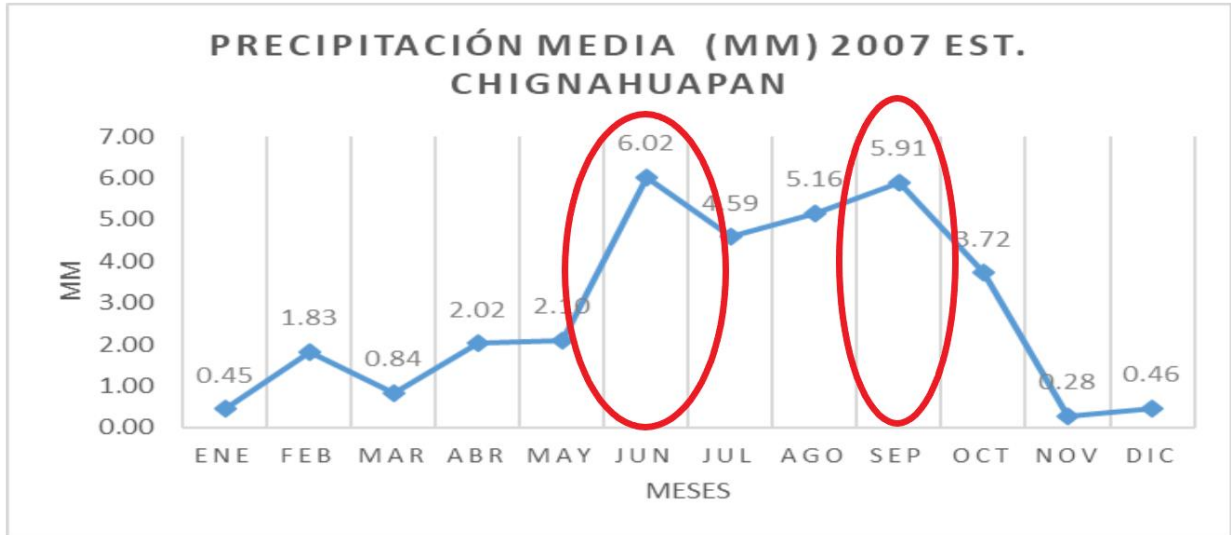


Figura 25.- Muestra la precipitación media anual del 2007, estación Chignahuapan.

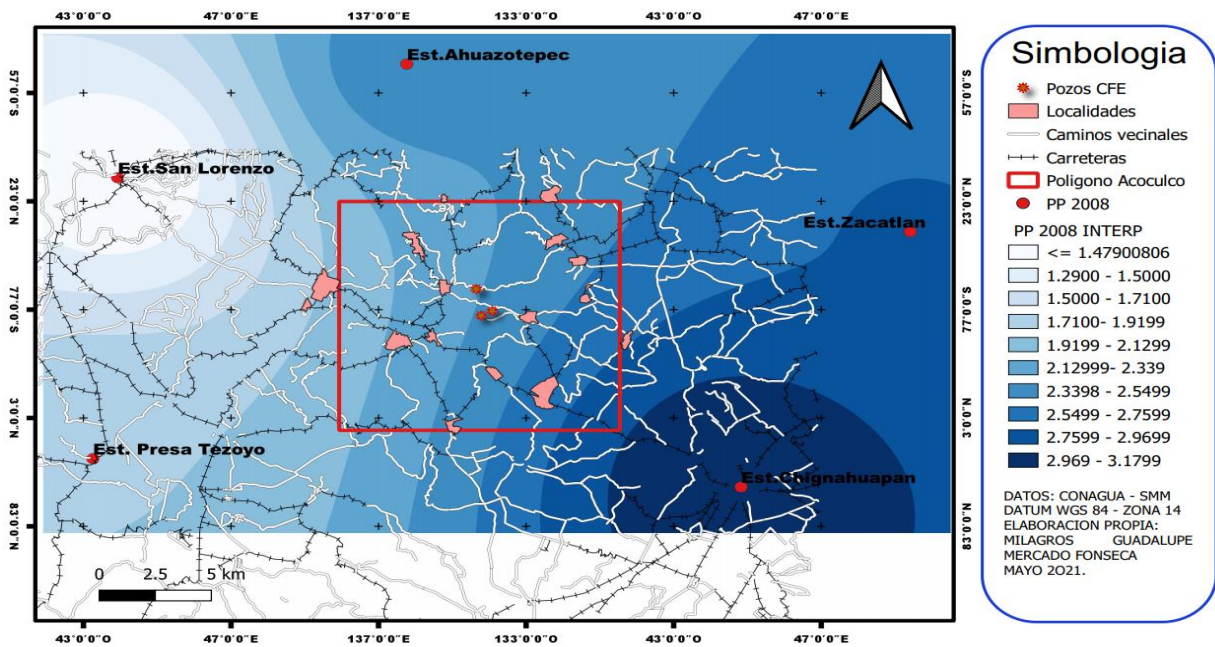


Figura 26.- Muestra de precipitación del año 2008.

Precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2008, es de 2.04 mm a 2.40 mm en la zona de estudio, Acoculco, Puebla.

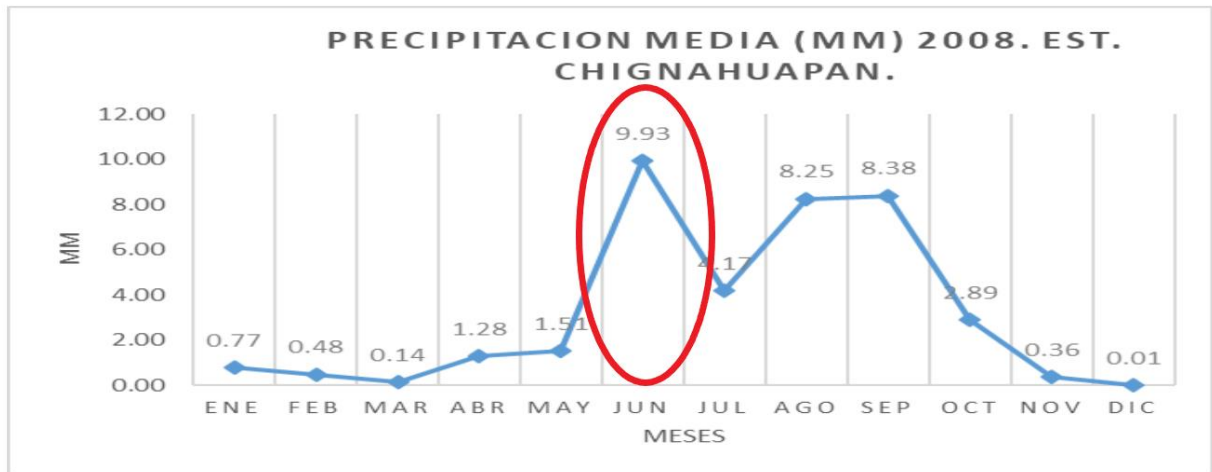


Figura 27.- Precipitación (mm) mensual del año 2008, estación, Chignahuapan.

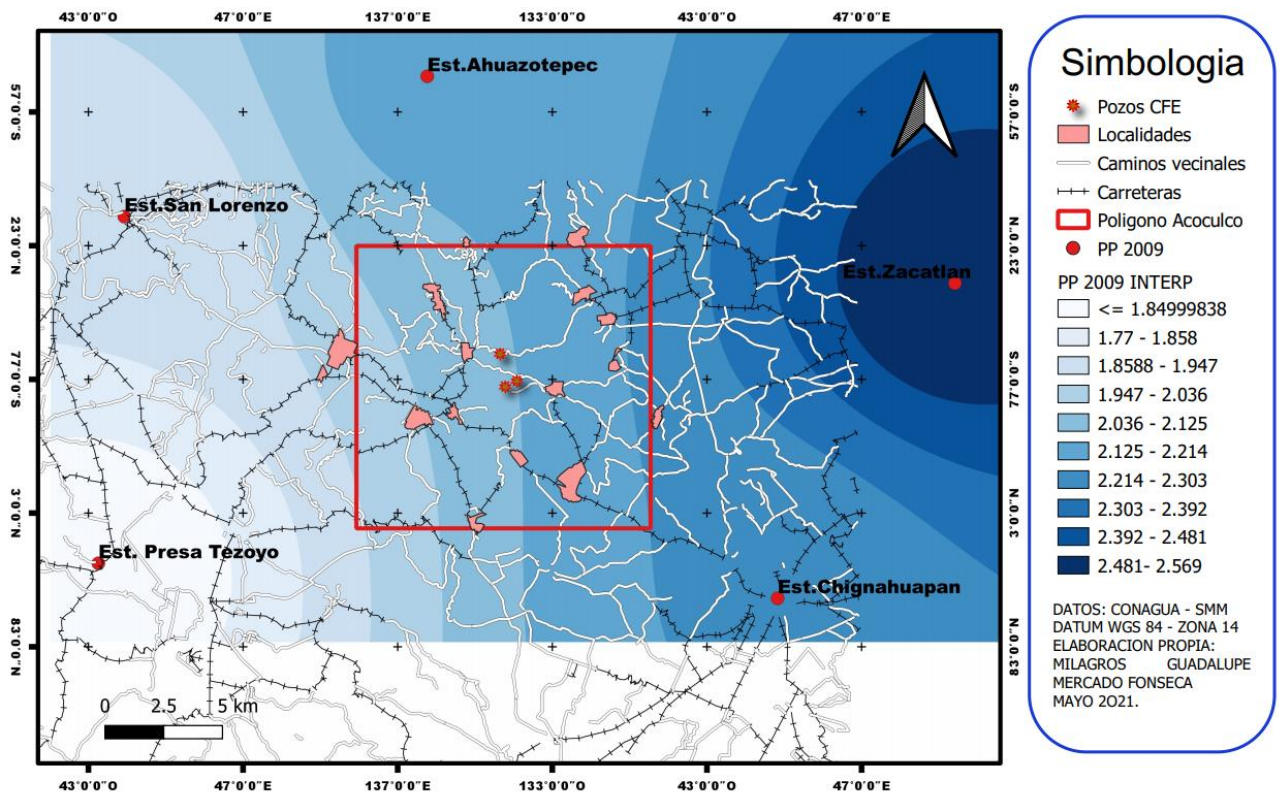


Figura 28.- Precipitación del año 2009.

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2009, de 2.04 mm a 2.21 mm en la zona de estudio Acapulco, Puebla.

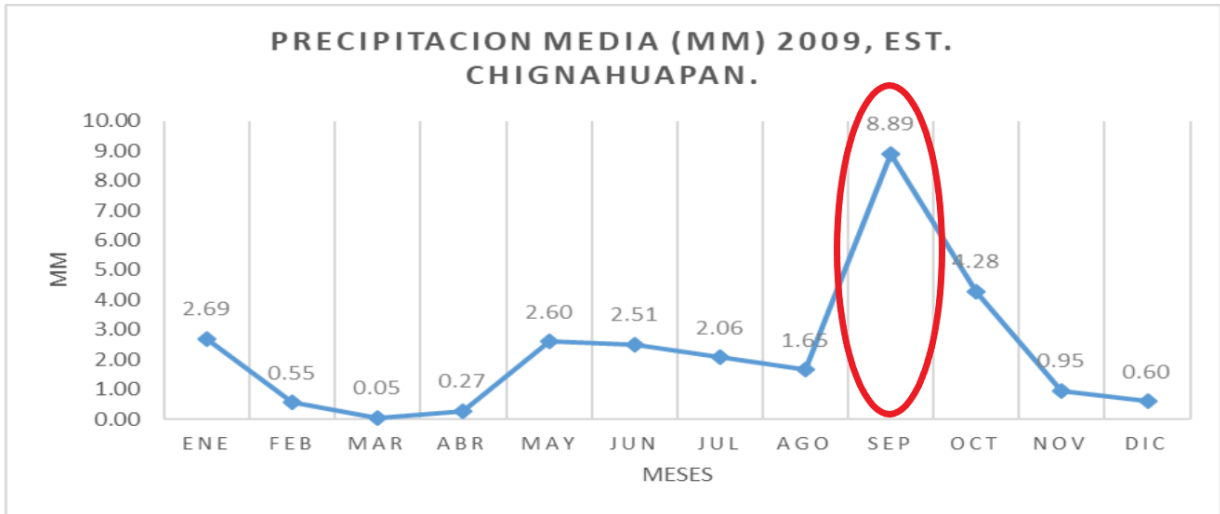


Figura 29.- Muestra la precipitación mensual (mm) del año 2009, estación Chignahuapan.

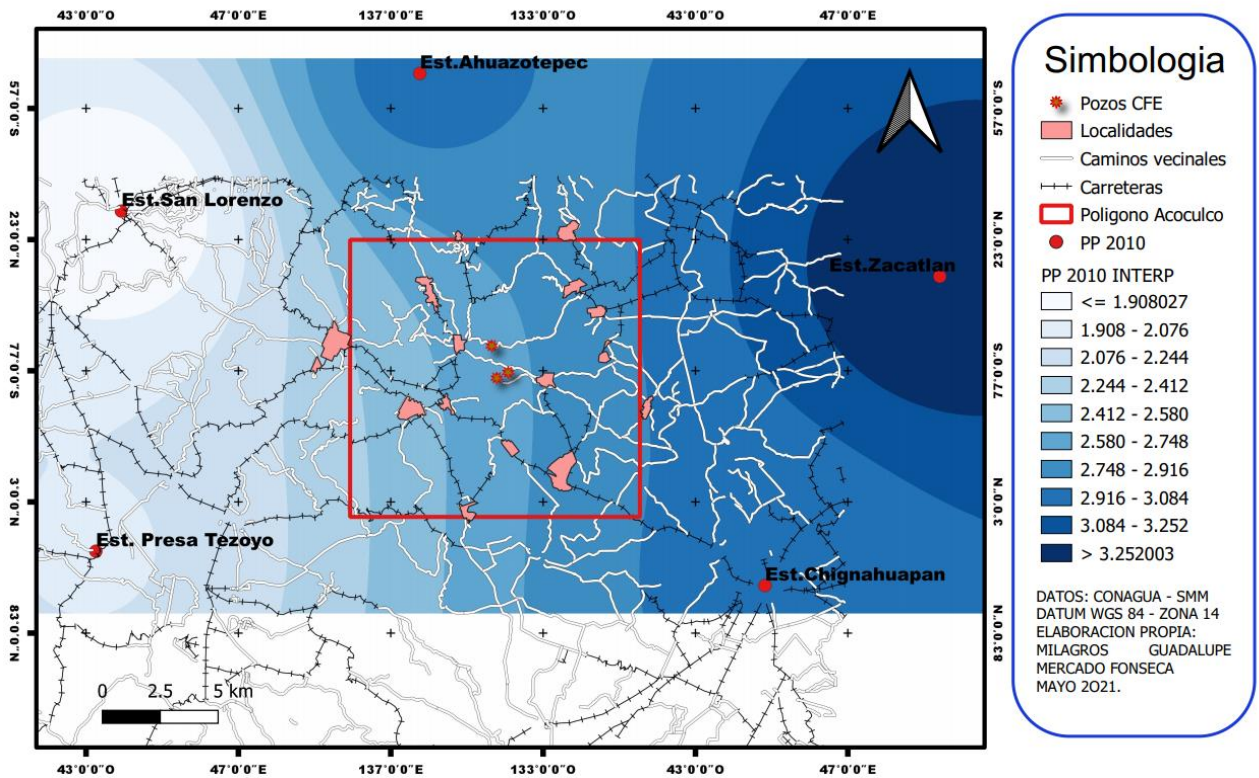


Figura 30.- Precipitación del año 2010

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2010, expresado como resultados 2.36 mm a 2.80 mm en la zona de estudio Aculco, Puebla.

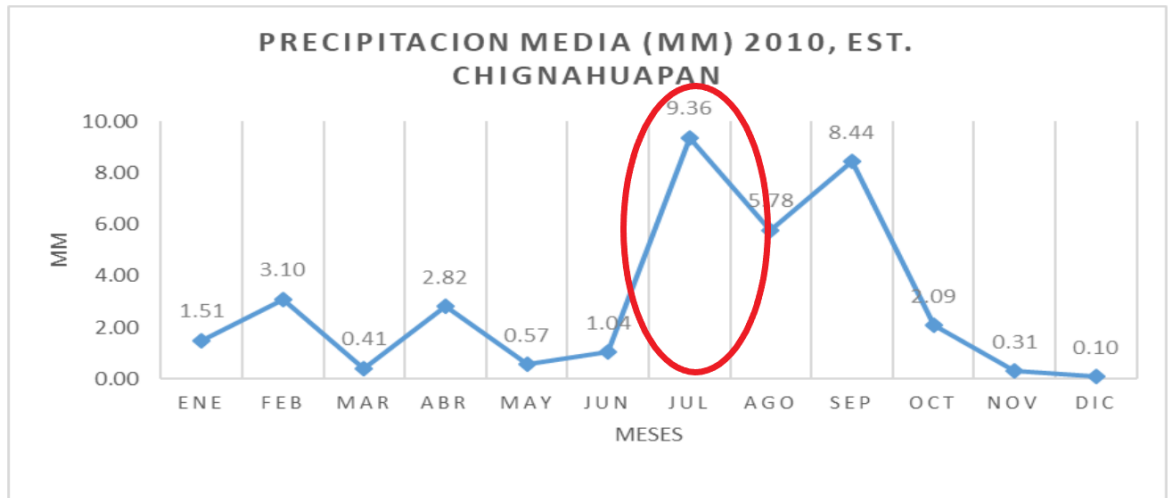


Figura 31.- Precipitación media del año 2010, estación Chignahuapan.

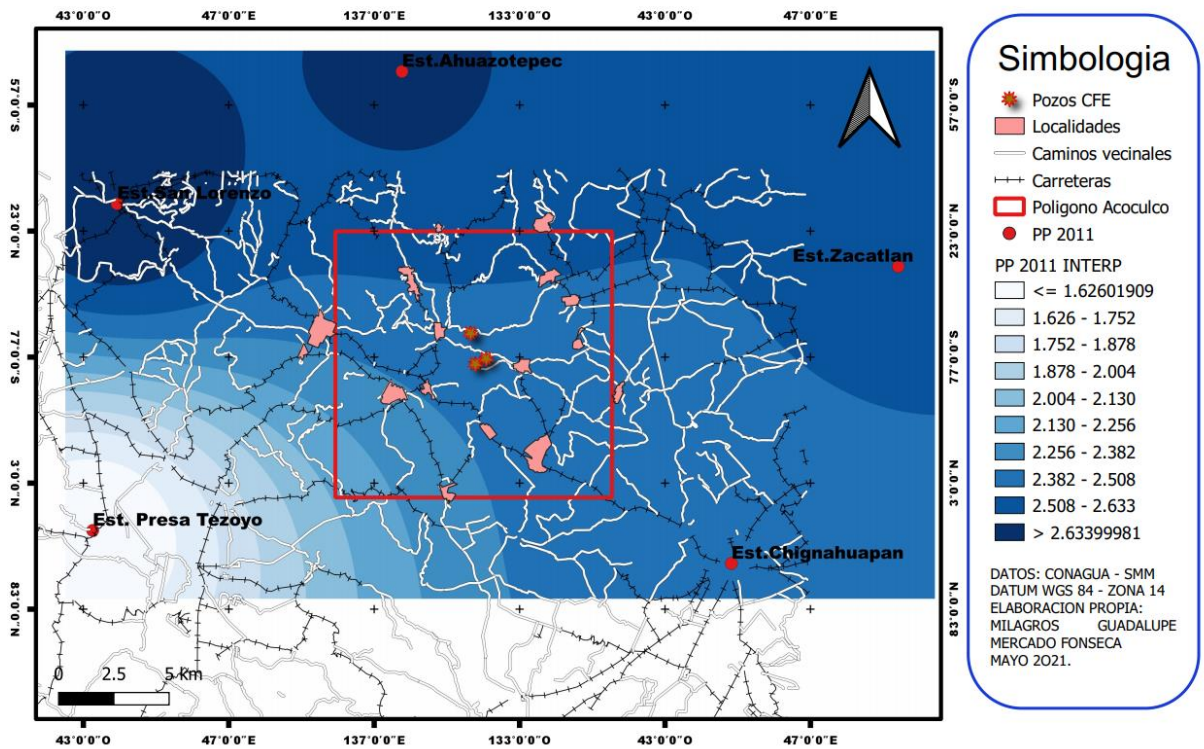


Figura 32.- Precipitación media anual del año 2011.

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones utilizadas en el año 2011, expresando como resultado 2.28 mm a 2.53 mm en la zona de estudio Acozulco, Puebla.

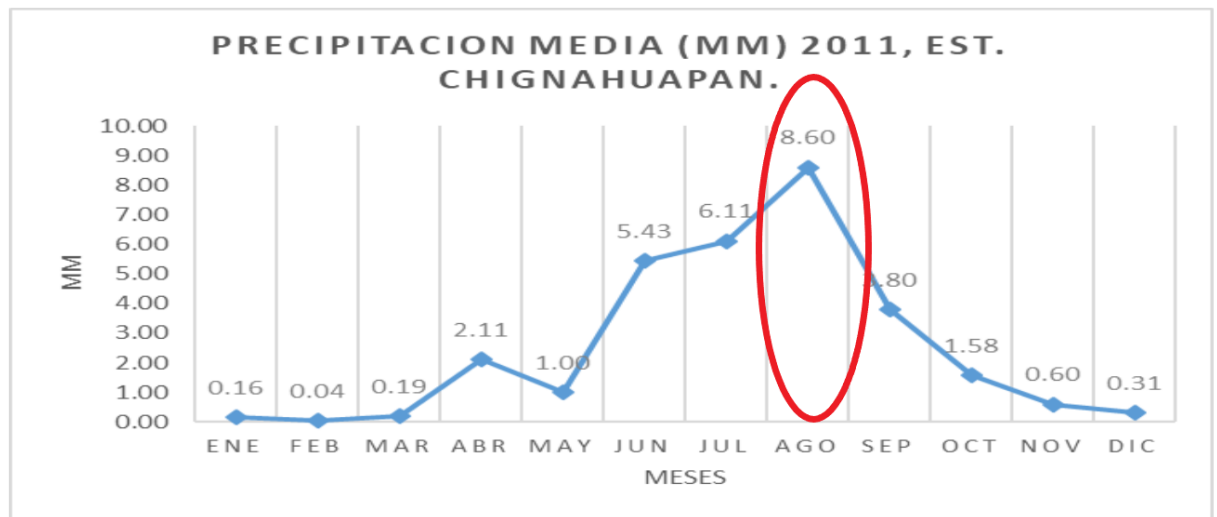


Figura 33.- precipitación media del año 2011, estación Chignahuapan

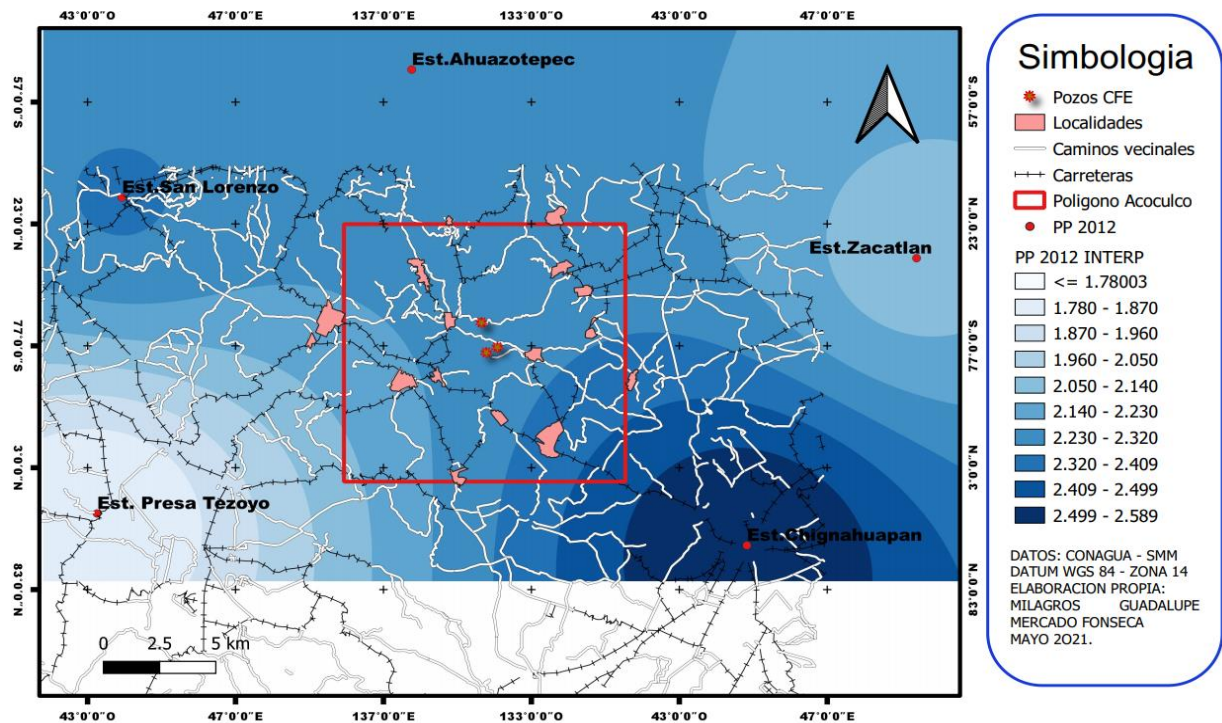


Figura 34.- Muestra la precipitación media del año 2012.

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2012, expresando como resultado de 2.09 mm a 2.3 mm en la zona de estudio Aocolco, Puebla.

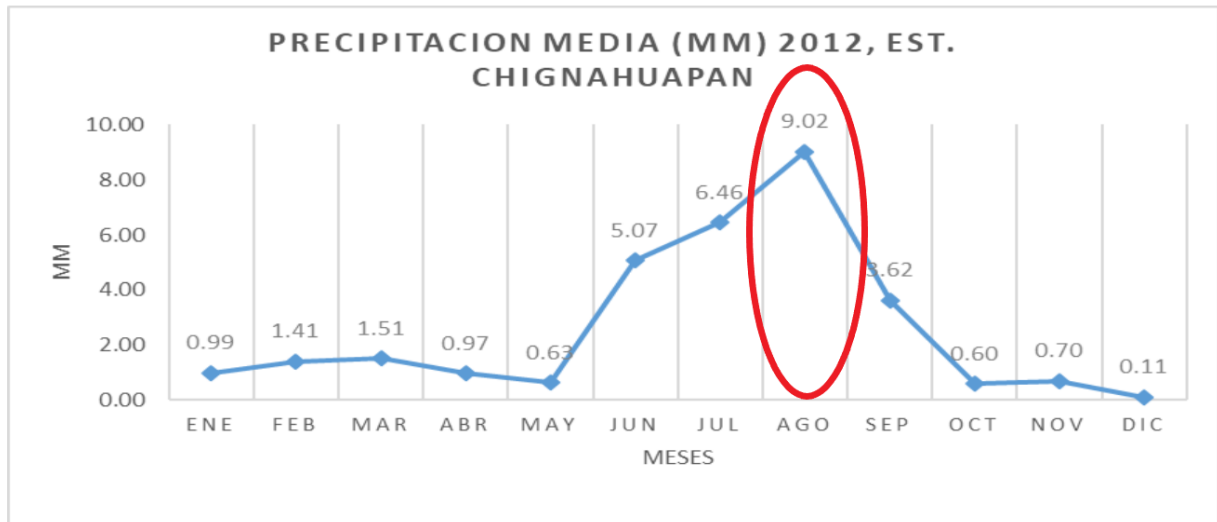


Figura 35.- Precipitación media del año 2012, estación Chignahuapan.

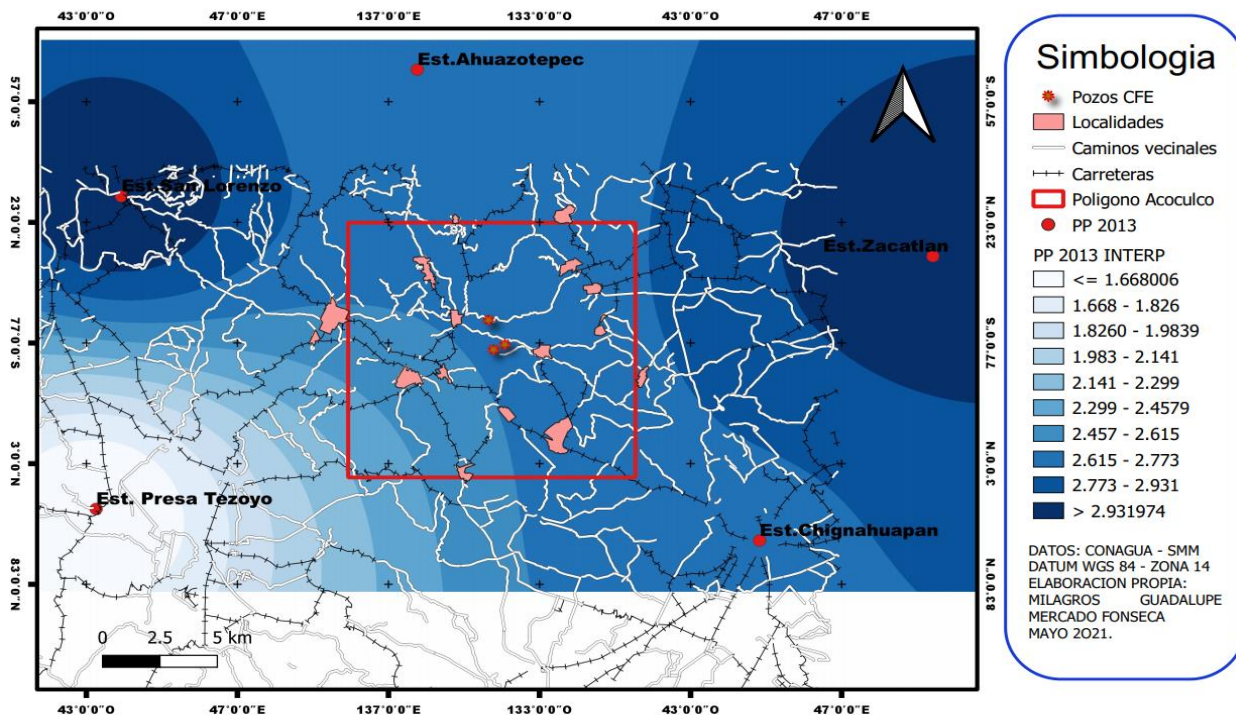


Figura 36.- Precipitación del año 2013.

Se muestra la precipitación media anual de las 5 estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2013, mostrando como resultado 2.51 mm a 2.73 mm en la zona de estudio Aocolco, Puebla.

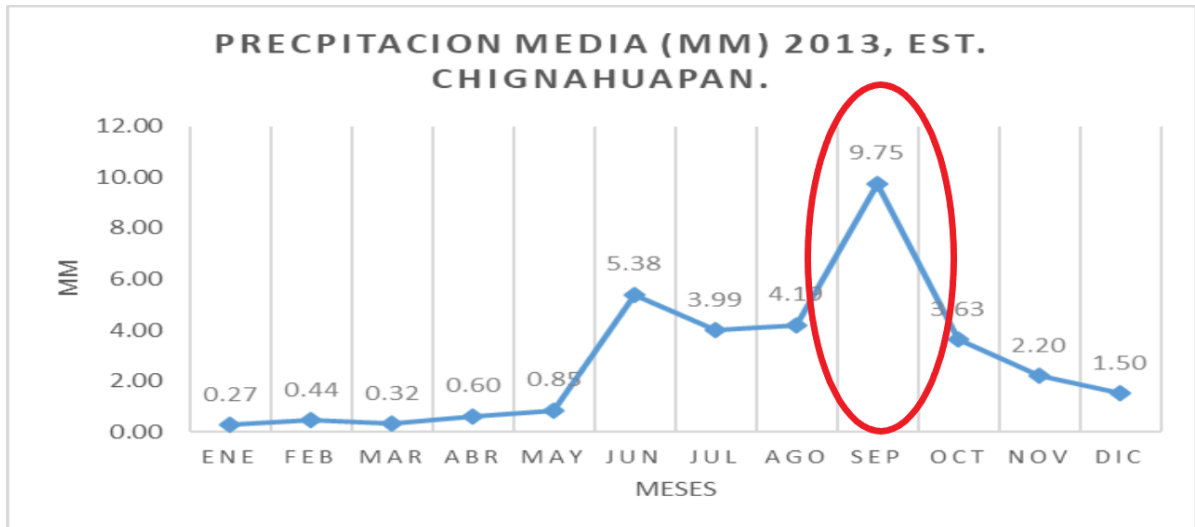


Figura 37.- Precipitación media del año 2013, estación Chignahuapan.

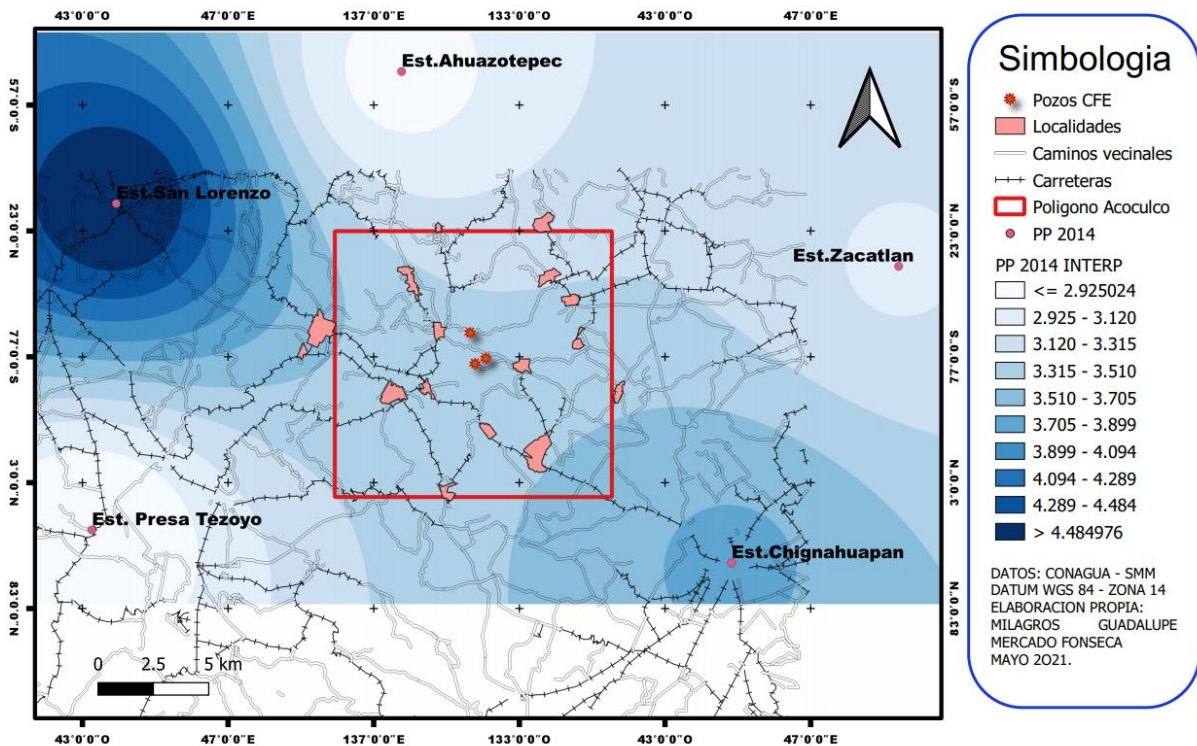
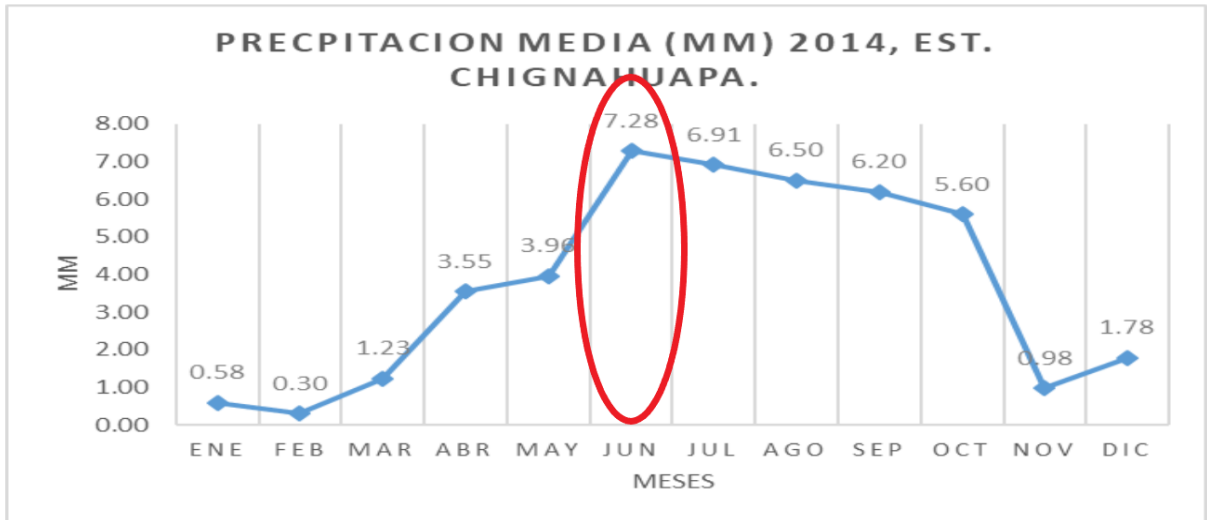
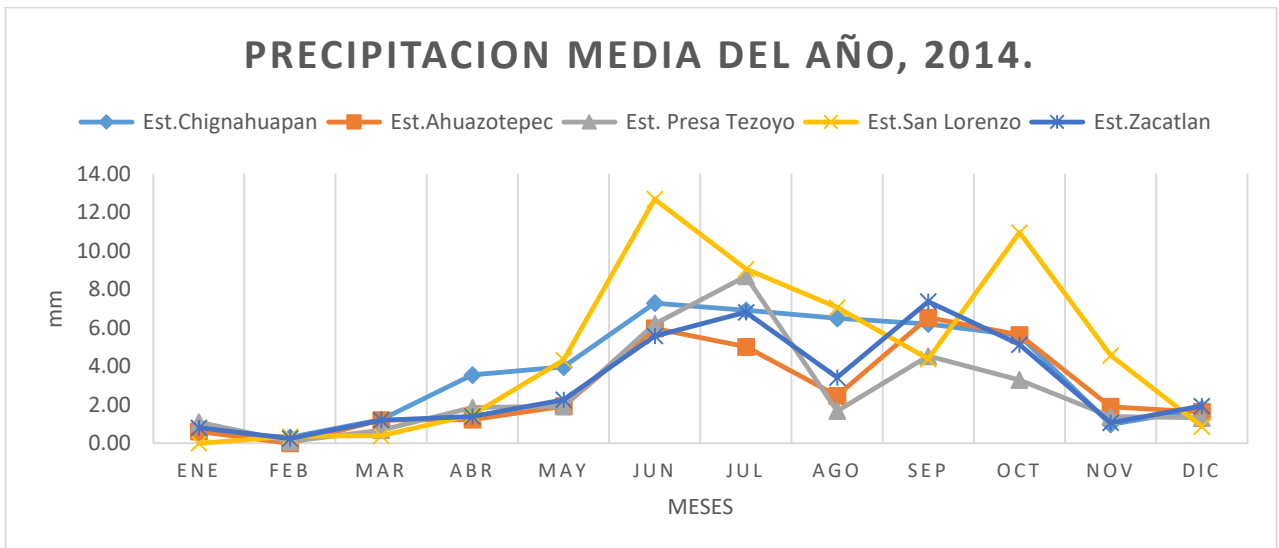


Figura 38.- Precipitación media del año 2014.

Se muestra la precipitación media anual de las estaciones meteorológicas utilizadas para el año 2014, expresando como resultados 2.51 mm a 3.02 mm en la zona de estudio Aocolco, Puebla.

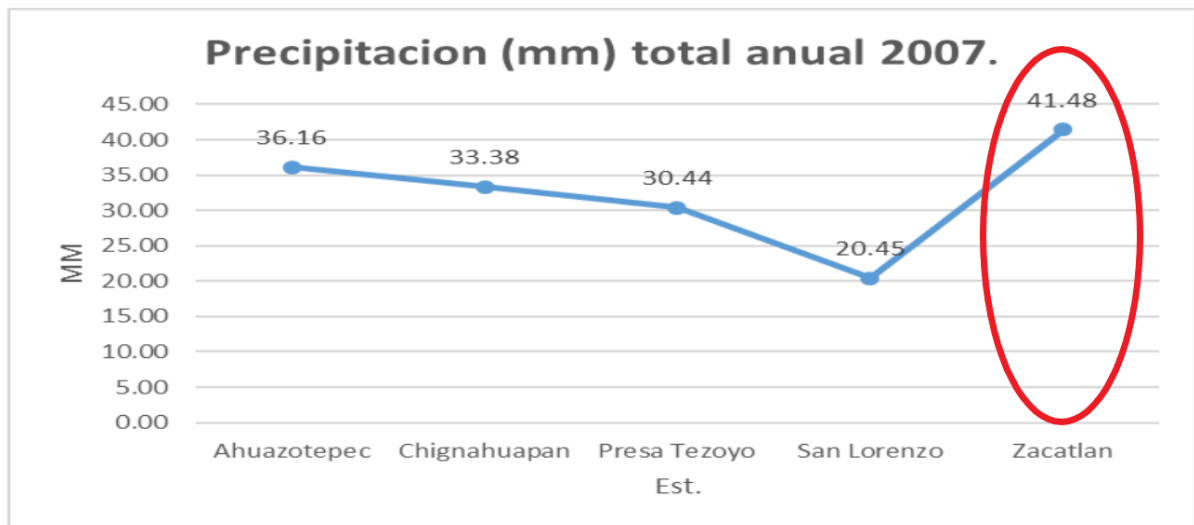


**Figura 39.-** Precipitación media del año 2014, estación Chignahuapan.



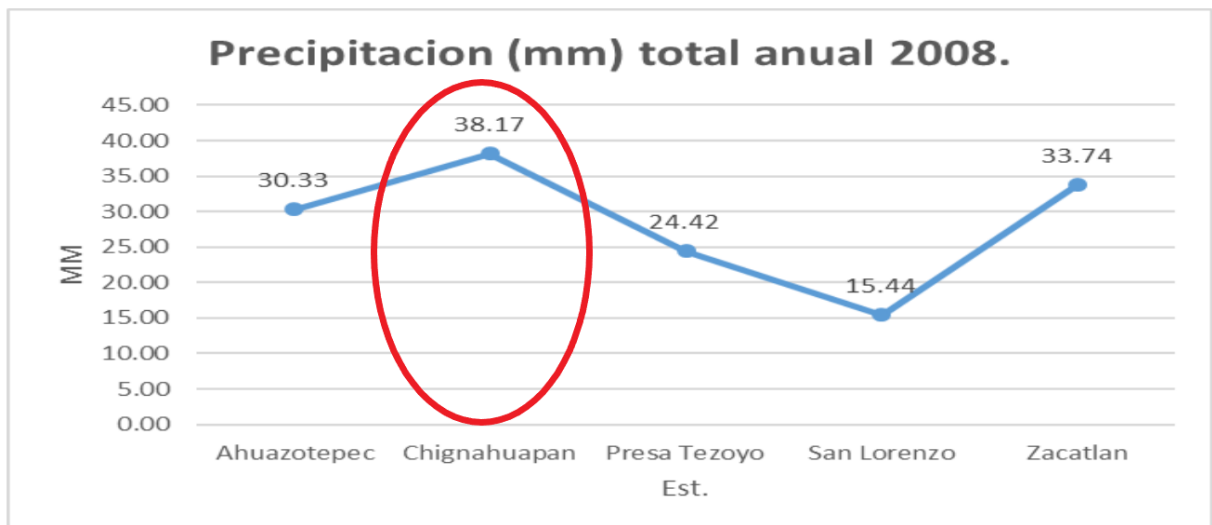
**Figura 40.-** En la cual se muestra la precipitación media, mostrando el comportamiento de las 5 estaciones para el año 2014.

Dando continuidad con los datos obtenidos mediante la interpolación se expresa la información de la precipitación promedio anual de los años 2007- 2014 de las estaciones que fueron utilizadas para la representación de las siguientes gráficas (Figuras 41 a 48).



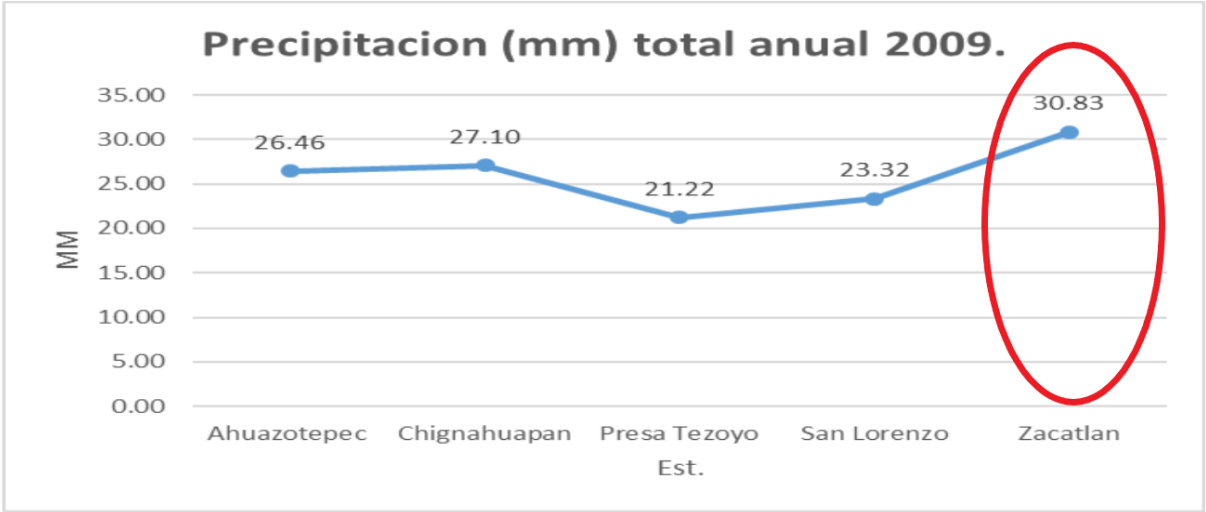
**Figura 41.-** Precipitación total anual 2007.

Muestra la precipitación (mm) total anual 2007, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (41.48 mm), tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



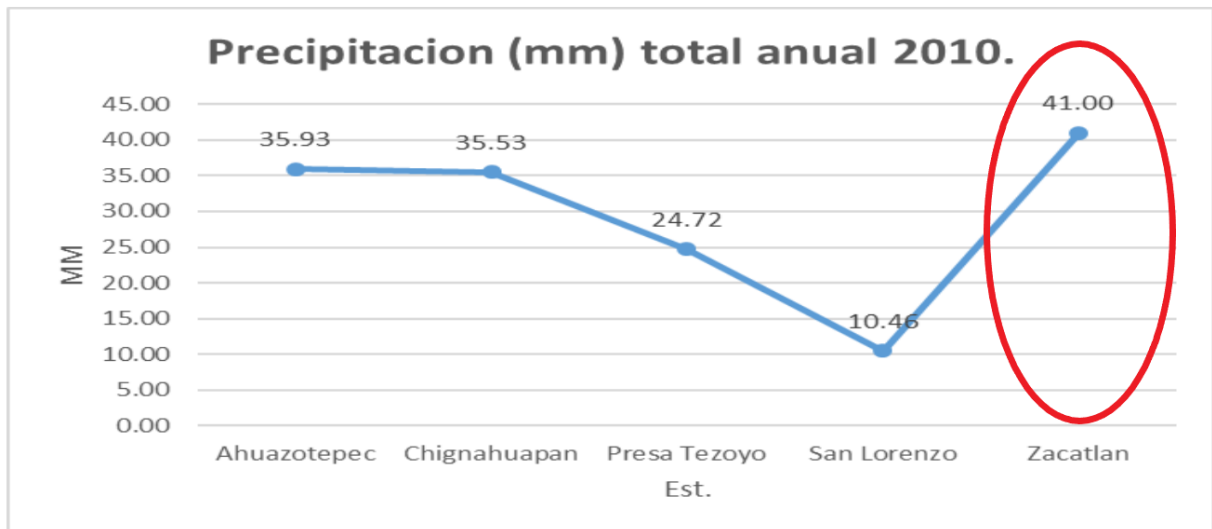
**Figura 42.-** Precipitación total anual 2008.

Precipitación (mm) total anual 2008, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (38.17 mm), tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



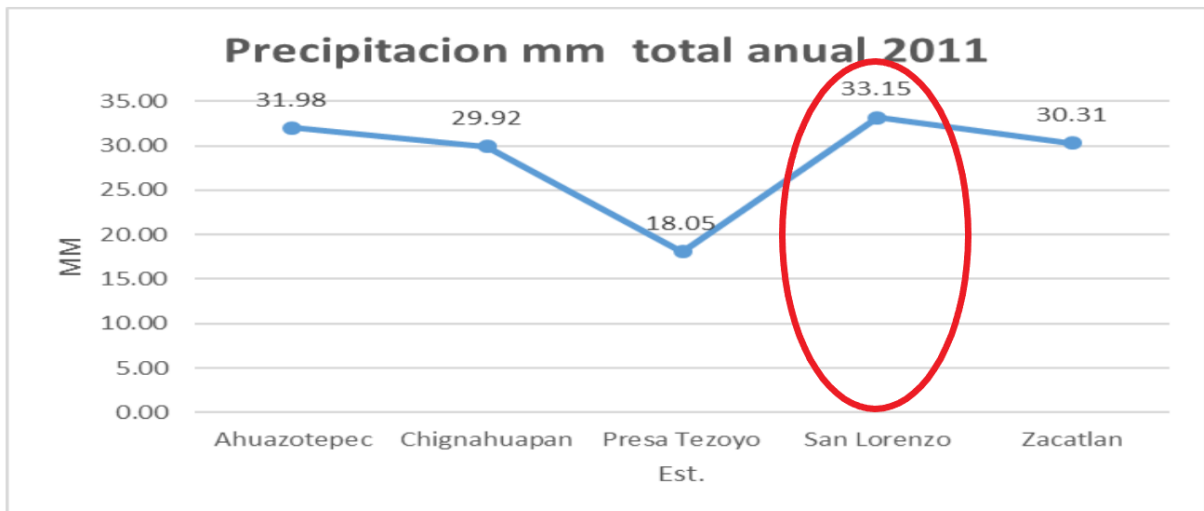
**Figura 43.-** Precipitación total anual 2009.

Precipitación (mm) total anual 2009, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (30.83 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



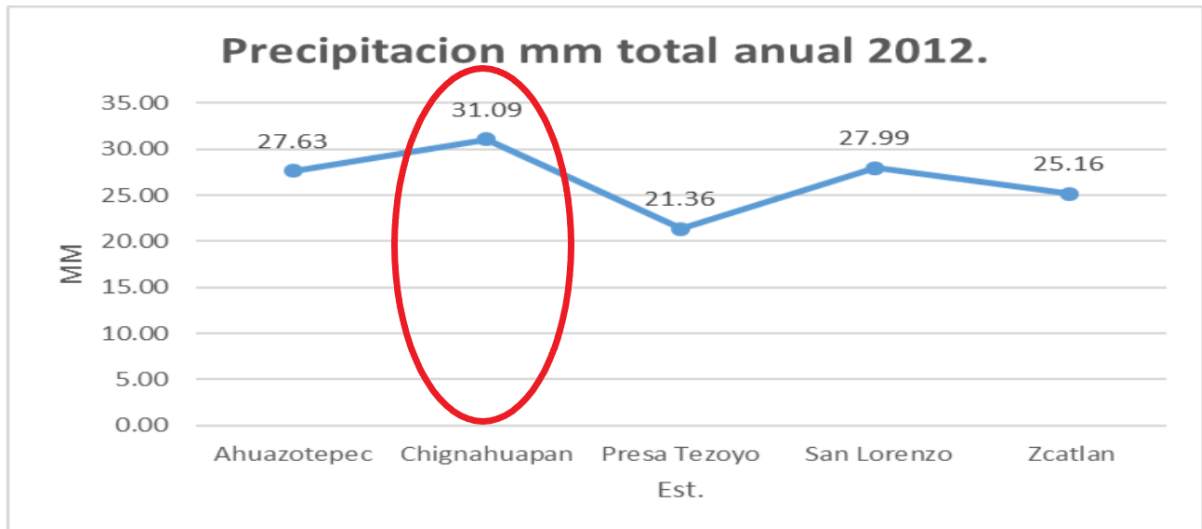
**Figura 44.-** Precipitación media anual 2010.

Precipitación (mm) total anual 2010, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (41.00 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



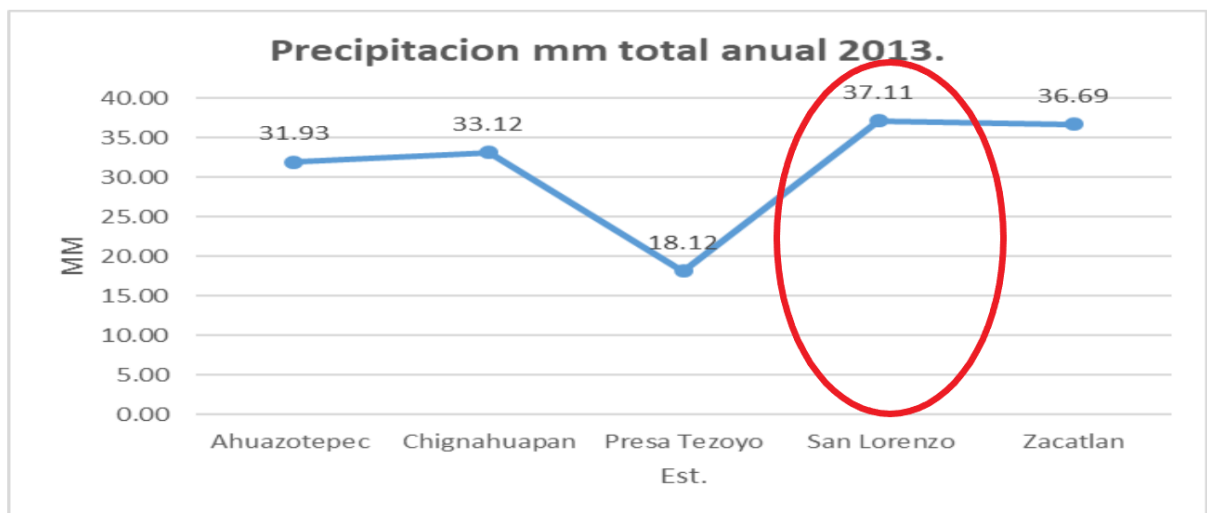
**Figura 45.-** Precipitación anual 2011.

Precipitación (mm) total anual 2011, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (33.15 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



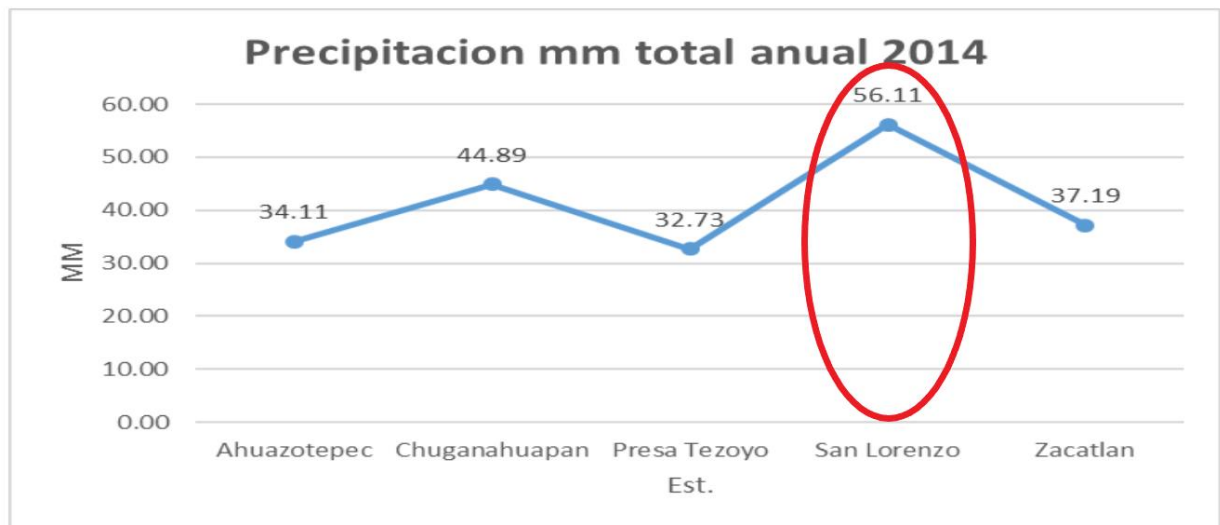
**Figura 46.-** Precipitación anual 2012.

Precipitación (mm) total anual 2012, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (31.09 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



**Figura 47.-** Precipitación anual 2013

Precipitación (mm) total anual 2013, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (37.11 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.



**Figura 48.-** Precipitación total anual 2014.

Muestra la precipitación (mm) total anual 2014, donde se aprecia con un círculo rojo la mayor precipitación (56.11 mm) tomando en cuenta las estaciones en relación con la zona de estudio.

Con la información obtenida de los mapas, se muestra que los años 2013 y 2014 revelan una gradiente mayor de precipitación anual exponiendo los siguientes datos año 2013, con 25.9 a 35.00 mm y el año 2014, 36 a 42mm, al hacer una comparación con otros años, se observa una marcada diferencia de los datos obtenidos de cada una de las estaciones. Para los datos del 2008, se presenta un gradiente menor de precipitación anual con valores que van de 19.8 a 33.4 mm anuales.

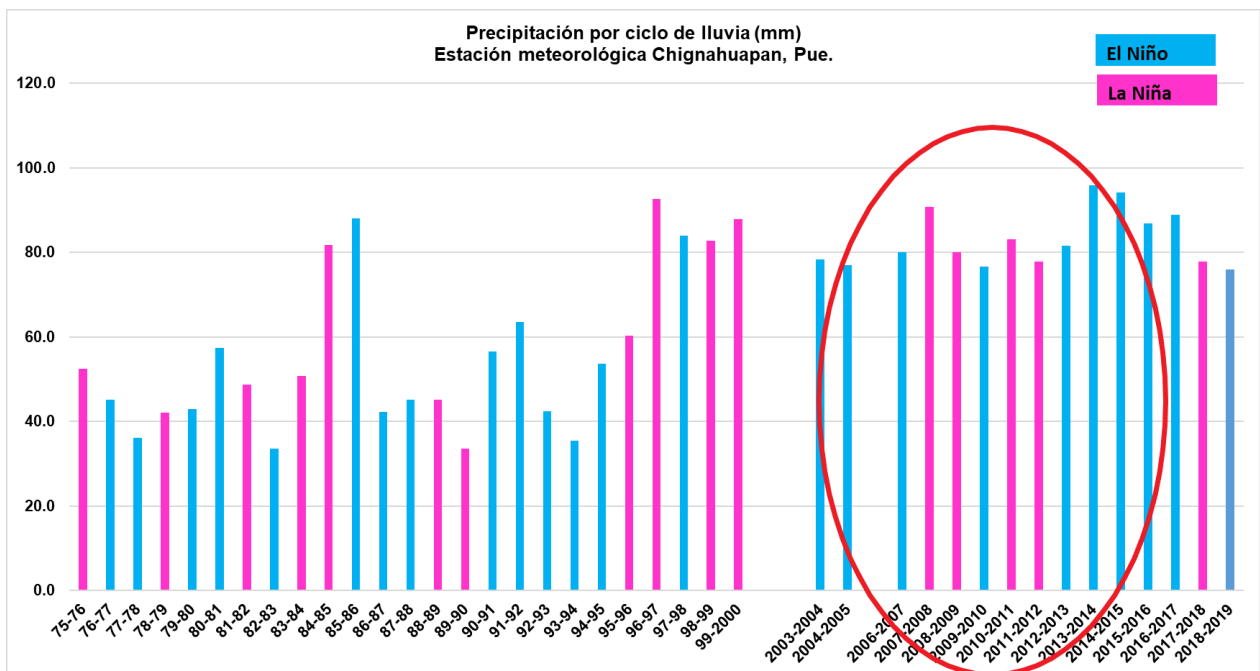
Por otro lado, las estaciones que muestran una precipitación (pp) mayor, en relación con la zona de estudio son: San Lorenzo, Zacatlán y Chignahuapan, siendo San Lorenzo la estación que anualmente muestra una precipitación de 56.11 mm.

Uno de los retos más grandes que hoy en día se enfrenta, son las variaciones climáticas que se producen cada año. Existen diferentes tipos de actividades que suelen verse afectadas por este constante cambio, tales como la agricultura, ganadería, pesca, el abasto de agua para uso doméstico, en las ciudades, la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, etc. (Briones et al 1998).

Los sucesos de El Niño y La Niña son ejemplos evidentes de la variabilidad climática global siendo parte fundamental de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas (Cerano-Paredes et al., 2011). Los sucesos cálidos/El niño y frío/La Niña, forma parte de un ciclo conocido como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

En nuestro país, el fenómeno ENOS tiene grandes repercusiones en el clima y, en gran medida, en las actividades socioeconómicas (Briones et al., 1998).

Estas investigaciones muestran disminución de precipitación hasta de 5% en las cuencas del centro-norte y sur-surestes del país.



**Figura 49.-** Precipitaciones (mm) de la est. Chignahuapan, con respecto a los fenómenos del niño y la niña.

Los datos de precipitación de la estación meteorológica de Chignahuapan (Figura 48), permiten relacionar las variaciones debidas a los fenómenos del Niño y la Niña, dentro de la figura se logra ver un circulo de color rojo donde muestra qué, donde muestra los años que se analizaron 2007 a 2014 y fue este periodo debido a que años anteriores no se cuentan con datos, es por ellos que se tomó este periodo.

Para el año 2007, se tiene una media de 6.02 mm de precipitación, en el mes de junio, mismo año que la CONAGUA reporta que se tuvo un año Niño.

Para el año 2008, se registra mediante la interpolación de datos una máxima de 2.40 mm de precipitación y mediante la gráfica de la estación Chignahuapan registra una máxima de 9.93 mm de precipitación, mismo año que la CONAGUA reporta que se tuvo un año Niño.

Para el año 2009, mediante la interpolación de datos el mapa muestra como media anual una máxima de 2.21 mm de precipitación, por otro lado, gráficamente se muestra el mes de septiembre con una precipitación media de 8.89 mm mismo año que la CONAGUA reporta que fue un año Niña.

Para el año 2010, mediante la interpolación de datos se obtuvo una máxima de 2.80 mm de precipitación media, por otro lado, gráficamente el mes de julio muestra un incremento de precipitación (pp) de 9.36 mm, mismo año que CONAGUA reporta que fue un año Niño.

Para el año 2011, mediante los procesos de interpolación se obtuvo 2.53 mm de precipitación media, por otro lado, gráficamente en la estación de Chignahuapan se muestra en el mes de agosto arroja la máxima precipitación de 8.60 mm, mismo año que CONAGUA reporta que fue un año Niña.

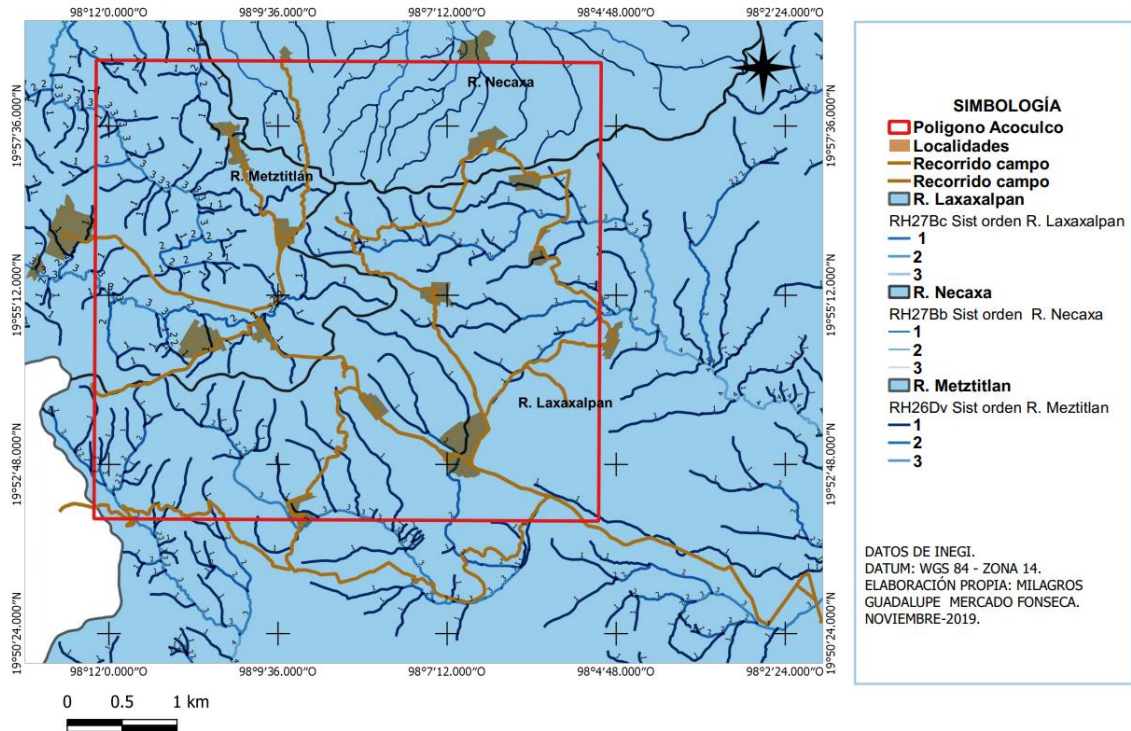
Para el año 2012, mediante el análisis de interpolación se obtuvo un 2.3 mm de precipitación media, por otro lado, gráficamente en la estación de Chignahuapan se muestra el mes de agosto con una máxima de 9.02 mm de precipitación, mismo año que CONAGUA reporta que fue un año Niña.

Para el año 2013, mediante el análisis de interpolación se obtuvo un 2.73 mm de precipitación media, por otro lado, gráficamente en la estación de Chignahuapan se muestra el mes de septiembre con una máxima de 9.72 mm de precipitación (pp), mismo año que CONAGUA reporta que fue un año Niño.

Para el año 2014, mediante del análisis de interpolación se obtuvo 3.02 mm como máximo, por otro lado, gráficamente en la estación de Chignahuapan se muestra que el

mes de junio con una máxima de 7.28 mm de precipitación (pp), mismo año que CONAGUA reporta que fue año Niño.

### 5.5.- Clasificación de la hidrología.



**Figura 50.-** Muestra el recorrido de campo que se realizó en la zona de estudio.

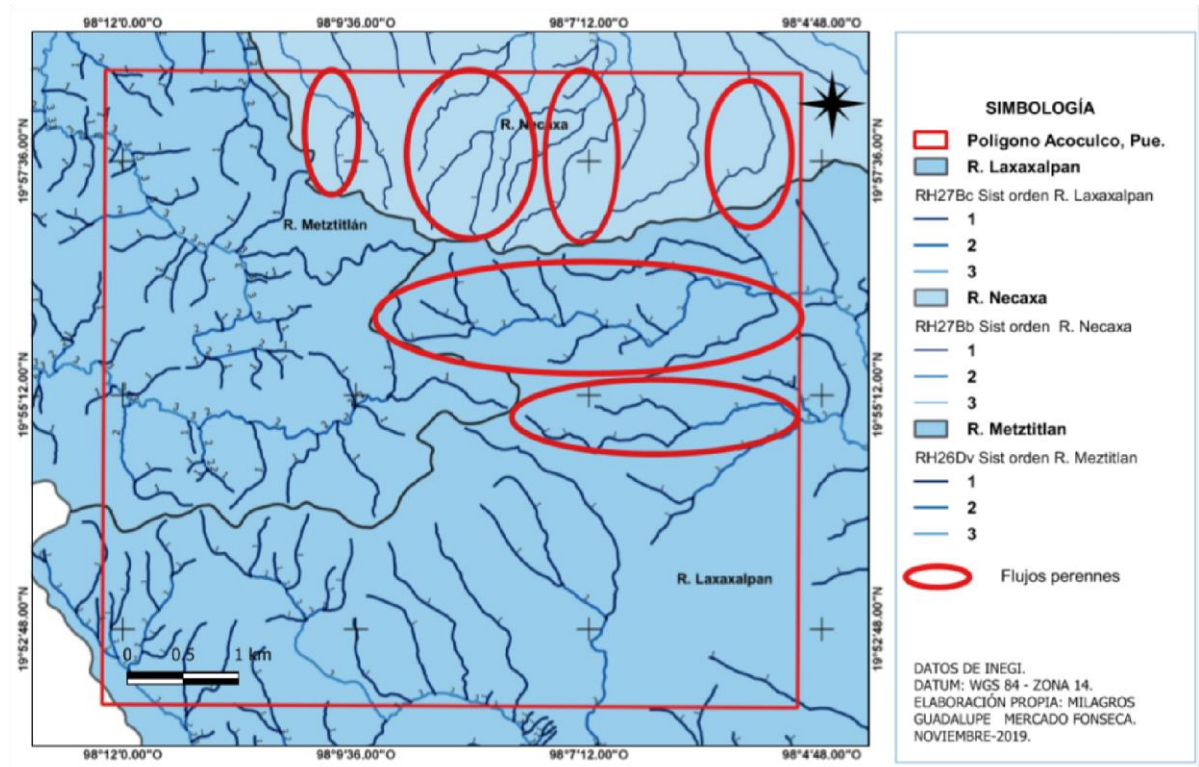
Durante el recorrido de campo (Figura 50 - 51), se identificaron dos tipos de flujos.

1.- Intermitentes también llamados efímeros, dichos cauces son sinónimos de zonas secas o semiáridas en tanto que las cuencas con cauces perennes son cuencas donde la lluvia está presente a lo largo del periodo hidrológico (Bateman, 2011).

2.- Perennes. - Este tipo de flujos siempre están en la superficie de un área.

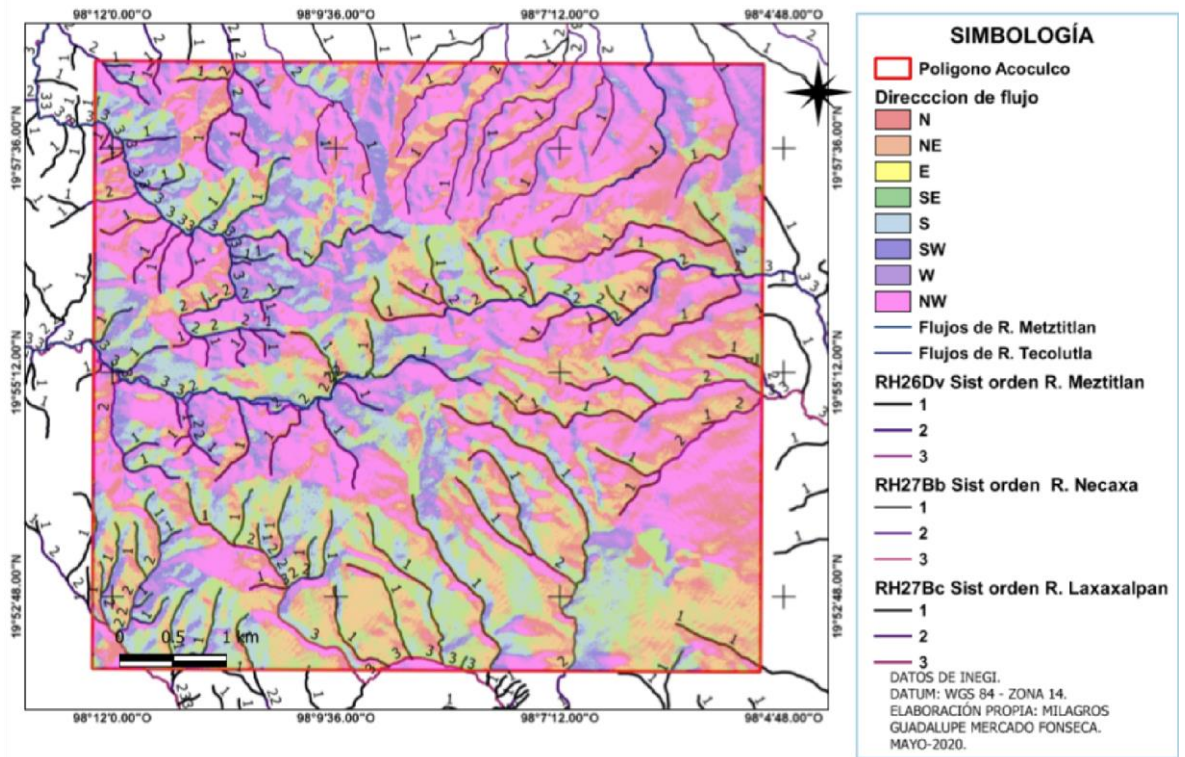
La información obtenida mediante los recorridos de campo, permitió identificar las diferentes microcuencas dentro de la zona de estudio, como también los diversos flujos. Se verificó la presencia de flujos intermitentes en la zona del polígono, localizados en el noroeste donde no hay agua superficial dentro de las Subcuencas. Esto permitió

determinar que el drenaje es muy bajo y la salida del agua por los cauces se relaciona estrechamente con los períodos de lluvias. También hay flujos perennes los cuales permiten dar vida a las actividades agrícolas y forestales, así como algunos embalses para uso pesquero, ganadero y/o agrícola. En la zona se encuentran 21 flujos perennes.

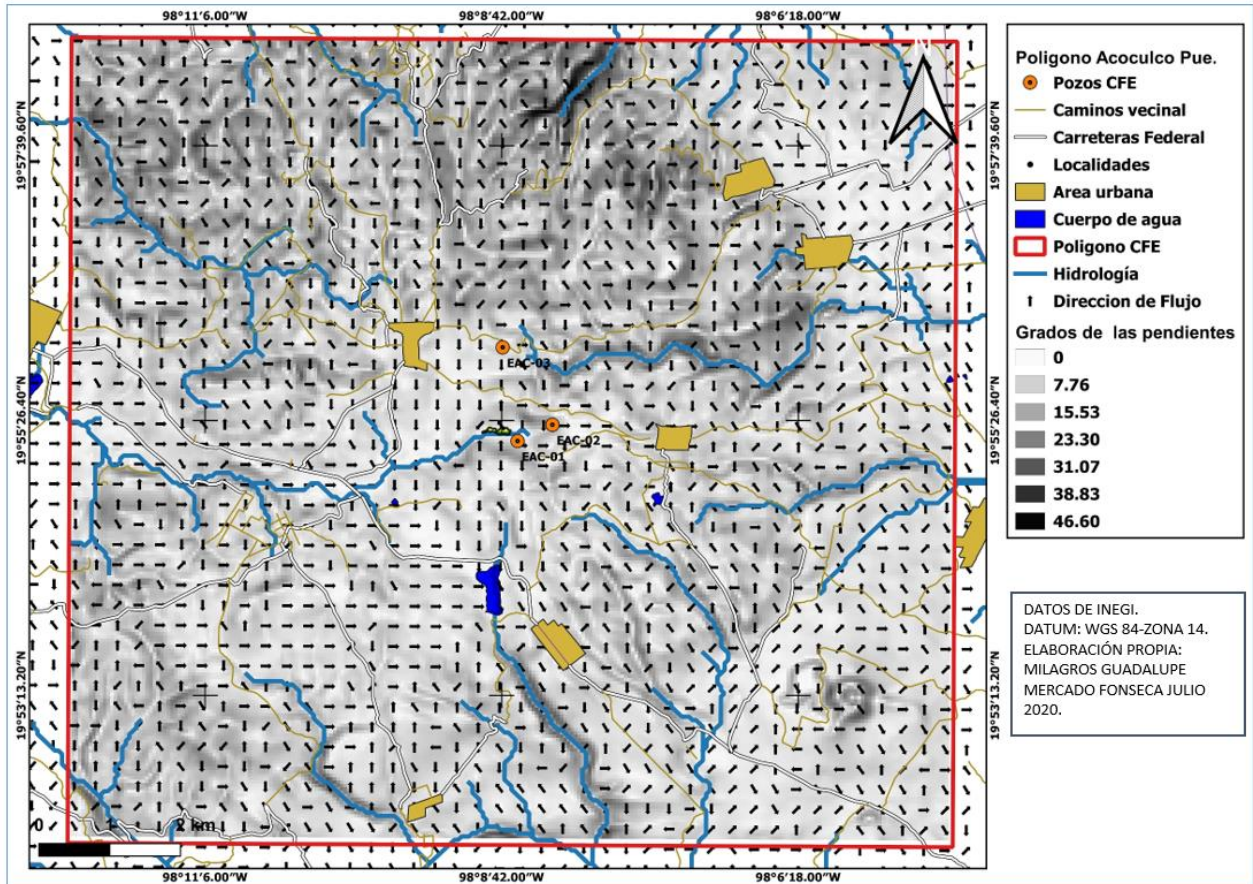


**Figura 51.-** Mapa en el cual se muestran los tipos de flujos existentes en la zona de estudio.

Se analizó la dirección del flujo dentro de la zona de estudio, identificando la dirección de cauce y el flujo de agua que conducen al cauce principal (Figura 50).



**Figura 52.-** Se logra observar la dirección del flujo superficial de la zona de estudio.



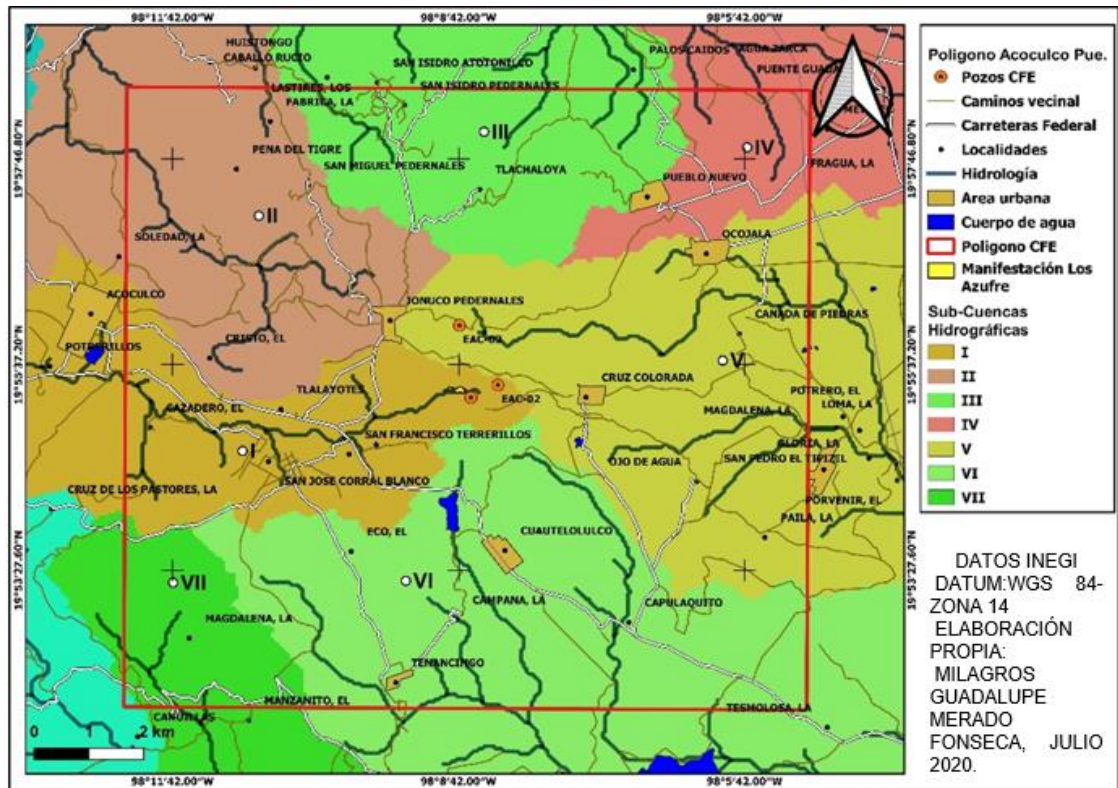
**Figura 53.-** Dirección de flujos, obteniendo una visualización puntual donde se nota la unión a flujos principales.

La figura 53 se realizó con el objetivo de tener una mejor vista de la dirección de flujos, dentro de la zona de estudio por medio del símbolo de flechas, las cuales dirigen hacia la unión de un sistema de orden mayor, las diferencias locales en estos factores pueden dar lugar a modalidades muy distintas de inundaciones, incluso en corrientes adyacentes, donde la proporción de agua de lluvia que se traduce en escorrentía o en agua subterránea depende del tipo de terreno y de su cubierta vegetal.

## 5.6. Análisis geomorfológico asociado a la cuenca hidrográfica

La geomorfología es una ciencia natural que se encarga del estudio del relieve de la superficie terrestre, surge para entender la interacción de los procesos exógenos o de superficies y los procesos endógenos que actúan sobre las rocas que afloran en la superficie terrestre, dando como resultado la formación de rasgos del relieve de diferentes órdenes que van desde las grandes estructuras planetarias como son los

océanos y continentes, hasta las pequeñas cárcavas y formas kársticas de carácter local. A partir de esos objetivos y teniendo en cuenta los intereses de los profesionales del campo de la geología, es la segunda vertiente sobre la cual se basan las investigaciones geomorfológicas (Pérez & Ponce, 2007)



**Figura 54.-** Subcuencas que se encuentran dentro del polígono de CFE, con su hidrología.

El valor de la relación de la elongación se acerca a la unidad cuando la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones occidentales, la relación de elongación está entre 0.5 y 0.8.

Datos de las sub-cuencas.

Tabla VII.- Muestra las características de las subcuencas.

Sub-Cuenca	Longitud (Km)	Perímetro (Km)	Área (Km <sup>2</sup> )
I	67,677.52	91,129.31	104,255,096.10
II	34,494.82	44,713.96	44,342,628.59
III	26,755.74	32,209.66	36,231,483.24
IV	21,550.97	41,912.08	29,019,154.44

V	58,603.51	71,620.24	84,940,747.59
VI	90,898.95	88,125.35	118,005,514.10
VII	157,455.76	122,036.00	245,970,503.30

Tabla VIII.- Muestra las características geomorfológicas de las cuencas.

Subcuenca	Cc	Tipo Cuenca	Re	Relieves
I	8.93	Alargada	0.170242226	Bajos
II	6.71	Alargada	0.217831113	Bajos
III	5.35	Circular	0.253857014	Bajos
IV	7.78	Alargada	0.282058136	Bajos
V	7.77	Alargada	0.177458779	Bajos
VI	8.11	Alargada	0.13485137	Bajos
VII	7.78	Alargada	0.112394754	Bajos

Al iniciar un estudio geomorfológico se debe basar por la ubicación de los puntos donde existan en los ríos, para así tener un estudio completo de las variables coexistentes en la cuenca. Toda cuenca debe estar delimitada en la cuenca su río principal tanto de aguas abajo como de aguas arriba. Aguas abajo idealmente por la cercanía a los límites de la cuenca en la cual se tiene interés.

## 6. DISCUSIÓN

Hoy en día existen diversas formas para mostrar los cambios de precipitación sobre los caudales de los ríos, cambios en el sistema de orden de una cuenca y esto conlleva a presentar sus afectaciones, las cuales pueden tener consecuencias graves y directas en la salud de los propios usuarios del agua por la limitada calidad y cantidad del recurso en la zona de estudio, aunado a los problemas ambientales debidos a las modificaciones en los ecosistemas que producen las actividades económica (Cerano et al, 2011).

Es por ello que es de vital importancia, llevar a cabo la gestión del recurso hídrico, mediante un enfoque preventivo con el objetivo de la adaptación al cambio

climático, así como al control y mitigación de los impactos ambientales derivados de su aprovechamiento (Campos Aranda 1998).

En la zona de estudio los factores abióticos tienen componentes de suma importancia, que determinan la disponibilidad del recurso hídrico superficial, que se lleva a cabo por medio de la conexión de tres subcuencas que juegan un papel importante por lo que representan hidrológicamente para la zona, así como también por los tipos de vegetación, la geología, condiciones físicas y químicas que permiten mantener un equilibrio en el ecosistema.

La minería a cielo abierto es el tipo de actividad dentro del área de estudio, la cual es reconocida como una de las operaciones de mayor impacto. Por ende, las condiciones hidrológicas se ven afectadas, ya que las acciones que se realizan destruyen la capa superficial y modifican los flujos que forman parte de un sistema hidrológico, incluso dicha actividad puede interrumpir el funcionamiento de la hidrología.

En la zona de estudio se realizan actividades mineras que tienen impacto directo al sistema de orden de la subcuenca Río Metztitlán, así como también en los escurrimientos que se propician a partir de la precipitación en la zona de estudio.

Por otro lado, la actividad ganadera en esta área, es importante por el desarrollo de familias productoras de ganado ovino, que requiere de manejo y de asesoría de sanidad.

Como lo muestran los resultados del análisis de la vegetación, las actividades forestales en la zona de estudio tienen alto valor debido al manejo forestal de aprovechamiento y conservación del bosque, que se lleva a cabo. Se tienen algunos resultados positivos y otros negativos, que quedaron representados en los mapas de la serie I y VI de datos de vegetación. El bosque de pino tiene una pérdida de 66.26% que se puede relacionar con el incremento de la agricultura temporal permanente. También se muestra una pérdida del 37.20 % de pastizal inducido y el incremento de vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino con un 491.03%, por lo que es el tipo que muestra la mayor cobertura en el territorio de estudio.

La actividad agrícola representada en estas series presenta una pérdida de 5.41%. Donde la agricultura de temporal anual y permanente mostró pérdidas de 17.81%. A diferencia de la agricultura de temporal permanente que aumentó su cobertura en 62.69% esto se puede deber a que esta actividad se mantiene debido a la precipitación de la zona. También Morales (2014), menciona que la agricultura se ha reducido con alta frecuencia sobre todo en los bosques de uso común y todo esto es gracias al plan forestal de Puebla, el cual su principal función es mantener las parcelas originales, como se logra apreciar en la tabla VI.

Una variable que puede estar determinando la presencia de actividades son los suelos, en la zona de estudio es del tipo Feozem háplico, el cual favorece diferentes tipos de agricultura y como en esta zona se practica la agricultura de temporal es de vital importancia la precipitación de la cual dependen las actividades económicas en el área, tanto agrícolas como forestales.

Por otra parte, el comportamiento de la precipitación y otras variables en la zona de estudio, suele carecer de datos puntuales de la zona, debido a la falta de estaciones meteorológicas y a la distancia en la que estas se encuentran. Según datos de la CONAGUA, la estación de Chignahuapan muestra el comportamiento de variables climáticas asociado al fenómeno El Niño y La Niña, con los datos obtenidos de las estaciones se reconoce que fue año 2014 un año Niño y concuerda con los datos que fueron obtenidos mediante el análisis estadístico realizado.

Por otro lado, en el año 2009 en la estación de Zacatlán muestra una mínima de precipitación anual de 30.83, los datos de CONAGUA muestran variabilidad climática relacionada con un año Niña, fenómeno que se caracteriza por ser frío.

En términos generales ambas condiciones según la CONAGUA, están presentes y cambian cada año, con un aumento de los caudales, especialmente en los regímenes de lluvia.

Por lo tanto, es vital importancia buscar las nuevas estrategias por medio del manejo integral de cuencas para lograr llevar a cabo una gestión equilibrada no solo de los recursos naturales sino también propiciar el fortalecimiento de las comunidades

locales, la unión de los actores implicados en los diversos problemas ambientales puede favorecer la búsqueda de alternativas viables, adecuadas a las condiciones locales. Los actores locales son pieza clave para llevar a cabo el manejo y gestión del recurso hídrico (Pérez, 2004).

Con respecto al aprovechamiento del recurso geotérmico para producción de energía eléctrica y su impacto sobre el recurso hídrico. Gildardo y Gama (2016), mencionan que existen tres componentes esenciales para llevar a cabo la actividad geotérmica que son: la fuente de calor, una roca permeable o roca sello y por último un reservorio o acuífero, por ende, si uno de estos factores falta no se puede realizar la actividad. En esta investigación se muestra que superficialmente no se cuenta con disponibilidad del recurso hídrico y por esto es necesaria la realización de una investigación para conocer las condiciones del flujo y almacenamiento subterráneo para conocer si se cuenta un acuífero profundo en la zona de estudio, que tendría la función de yacimiento geotérmico, o en su defecto aprovechar el recurso como un yacimiento de roca seca caliente. El uso actual que se le da al recurso geotérmico superficial se vería vulnerado al cambiar las condiciones hídricas naturales de la zona.

## **7.- CONCLUSIONES**

En este trabajo se describen las condiciones bióticas y abióticas que determinan el funcionamiento hidrológico de la zona de Acoculco, Puebla.

Dentro de los componentes abióticos se encontró la conexión entre tres subcuencas, lo cual determina la disponibilidad del recurso hídrico superficial.

Se identificó que la disponibilidad del recurso hídrico es de tipo intermitente lo que es un factor determinante para el desarrollo y crecimiento de la zona de estudio para las diferentes actividades como la agricultura, actividades forestales, entre otras.

A partir de la reclasificación del mapa geomorfológico, se evidencian las áreas de mayor pendiente, esta regularidad probablemente se deba a que las pendientes más pronunciadas se vinculen con escarpes y éstos a fallas donde la erosión ha alcanzado relieves más altos.

La metodología propuesta permitió la incorporación en el modelo de una gran cantidad de información, que por su sencillez y facilidad de aplicación utiliza solo las funciones básicas del SIG.

La instalación de una planta geotermoeléctrica en la zona de estudio potencialmente podría tener un impacto indirecto en la hidrología superficial, con el cambio de uso de suelo, al construir caminos, por ductos y plataformas de pozos productores. Aunque el tipo de instalación lo determinará el tipo de recurso geotérmico que se determine en la zona. Incluso, sí se aplicará el concepto de desarrollo sostenible en la zona, se podría respetar el sistema de orden de subcuencas hidrológicas superficiales, para preservar los servicios ambientales, sociales, culturales y económicos que presta el recurso hídrico en la región. Con un plan de manejo y monitoreo adecuados, podrían garantizar el suministro y calidad del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos constituyen una valiosa información en manos de los tomadores de decisión que ayudan a la gestión integral de los recursos del municipio a fin de mitigar los efectos antropogénicos dentro de la zona de estudio.

Con este trabajo se logró analizar el sistema ambiental para el aprovechamiento integral del recurso hídrico superficial en la zona de exploración geotérmica Acoculco, Puebla.

## **8.- Recomendaciones**

Antes de finalizar dicho trabajo de investigación, se sugiere la instalación de estaciones meteorológicas, dentro de la zona de estudio, para la obtención de datos puntuales y actuales, ya que en esta investigación lo más actual en cuestión de datos meteorológicos tales como la precipitación fue sobre el año 2014.

En base los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda un análisis completo de la hidrología superficial, en función de los escurrimiento e infiltración del recurso hídrico.

Una investigación sobre la hidróloga subterránea y su conexión para la instalación de una planta geotermoelectrica en la zona de estudio Acoculco, Puebla.

Llevar a cabo una investigación sobre las actividades forestales y la parte social cultural.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Aranda, D. C. (1998). Procesos del ciclo hidrológico.pdf (pp. 1–550). pp. 1–550.

Ambiental,” 1–29. Retrieved from

[http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/cambio\\_climatico/Informe-Moran-mineria.pdf](http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/cambio_climatico/Informe-Moran-mineria.pdf)

Bellotti, M. L. (2011). Minería a cielo abierto. Revista de Derecho de Daños, “Daño

Bateman, A. (2011). Hidrología básica y aplicada. Brazilian Journal of Biology, 71(1), 241–253. Recuperado de <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>

Bando Murrieta, U., Garrido, A., Altamirano del Carmen, M. Á., Martínez Fernández, J. (2007). Proyecciones de cambio climático para las cuencas de México. Las cuencas hidrográficas de México, 2100, 1–4.

Briones, E. E., Bonilla, M., Badan, A., Caballero, M., & Winckell, A. (1998). Los efectos del fenómeno del niño en México. 1–248.

Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., & Constante-García, V. (2011). El Niño Oscilación Del Sur Y Sus Efectos En La Precipitación En La Parte Alta De La Cuenca Del Río Nazas. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, XVII (Especial), 207–215. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.076>

Conagua. 2014. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

CONAGUA. (2016a). LEY DE AGUAS NACIONALES. 1–110.

CONAGUA. (2016b). Reporte del Clima en México. Servicio Meteorológico Nacional, 1–32. Retrieved from <http://www.accuweather.com/en/mx/mexicoweather>

Cotler, H., & Pineda, R. (2008). Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos? Boletín Del Archivo Histórico Del Agua, (39), 16–21.

Gálvez, J. J. O. (2011). Ciclo hidrológico. 1–44.

Gildardo, J., y Gama, G. (2016). Procesos geológicos del campo geotérmico Acoculco, Puebla, México. 2, 1–14.

Graf, S. H., & Bauche, P. (2015). “*El pago por servicios ambientales como instrumento de conservación de cuencas*”. 1–188.

Gonçalves, H. C., Mercante, M. A., & Santos, E. T. (2007). Hidrología básica y aplicada. Brazilian Journal of Biology, 71(1 SUPPL.), 1–70.

García Aguirre, F. (2012). *La minería en México*. 1–10.

García-Palomo, A., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G., & Mora, J. C. (2002). Volcanic

stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 41(2), 1–19.

Gemex, P. (2021). Geothermal energy in Mexico: update and perspectives. *Mexican Geothermal Association*, 466(4), 1–13.

Gildardo, J., y Gama, G. (2016). *Procesos geológicos del campo geotérmico Acoculco, Puebla, México*. 2, 1–14.

Gutiérrez A, 2021, infografía tipo de cuencas, IMTA.

Gonzalo Halffter, M. C. y C. H. (2018). *Ganadería sustentable en el Golfo de México*.

Hiriart Le Bert, G., Gutiérrez Negrín, L. C. a., Quijano León, J. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S., & Hernández, I. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. 164.

Huttrer, G. W. 2021. Geothermal power generation in the world 2015-2020 update report. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April-October 2021. 17 pp.

Herbert, J. H. (2006). Métodos de minería a cielo abierto. 1–119.

Hernández L. (2008). La ganadería ovina en pequeña escala y su impacto en el desarrollo rural, Chignahuapan, Puebla.

Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bull.*, 56, 275-370.

INEGI, I. N. de E. y G. (2000). Síntesis Geográfica del Estado de Puebla. Inegi, 1–4. Retrieved from.

Inegi. 2014c. Uso del suelo y vegetación. Consultado en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/Default.aspx> (15/06/2014).

Inegi. 2009 Información básica para la construcción de la tasa de deforestación.

Javier, F., Tradacete, C., Ángel, J., Llanos, S. De, Luis, J., Burdiel, G., Iglesias, D. G. (2015). Hidrológica del Pánuco. 1–52.

Jefferson S. Hall, Vanessa Kirn, Estrella Yanguas-Fernández, E. (2015). *La gestión de las cuencas hidrográficas para asegurar los servicios ecosistémicos en las laderas del neotrópico*.

LOPEZ, F., M. BLANCO, 1976. Hidrología Forestal, 1a Parte. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España, 387 pp.

[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222949/702825222949\\_10.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222949/702825222949_10.pdf).

López-Hernández, A. 2009. Evolución Volcánica del Complejo Tulancingo-Acoculco y su Sistema Hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 170 pp.

Lermo, J., Antayhua, Y., & Bernal, I. (2009). *Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. México Seismic monitoring at the geothermal zone of Acoculco, Pue Mexico*. 22(1), 1–19.

Maya, R., & Gutiérrez, N. L. (2007). Recursos geotérmicos para generar electricidad en México. *Revista Digital Universitaria*, 8(12), 1–13. Retrieved from [http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art91/dic\\_art91.pdf](http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art91/dic_art91.pdf)

Méndez, C. A. O., Armenta, M. F., y Silva, G. R. (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, 24(1), 1–92.

Mijares, F. J. A. (1993). Fundamentos de la hidrología de superficie. In *Area*

Morales M., M. (2014a). Estudio de Cuenca de Abasto para la Región Chignahuapan-Zacatlán, Puebla. 225. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/22/6249Chignahuapan - Zacatlan.pdf>

Moreno, J. M. M. (2015). Cuencas de México. (1), 1–44.

Ordóñez, J. (2011). ¿Qué Es Cuenca Hidrológica Sociedad Geológica de Lima 1, 1–44? Retrieved from [http://www.gwp.org/Global/GWPSAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWPSAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf).

Pérez, J. C. (2004). Manejo integral de Microcuencas en la Subcuenca Guanajuato, Guanajuato. In *El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Pérez, A. G., & Ponce, R. M. B. A. D. (2007). *Delimitación de las Cuencas Hidrográficas de México a escala 1 : 250 000 Helena Cotler Avalos*. 1–35.

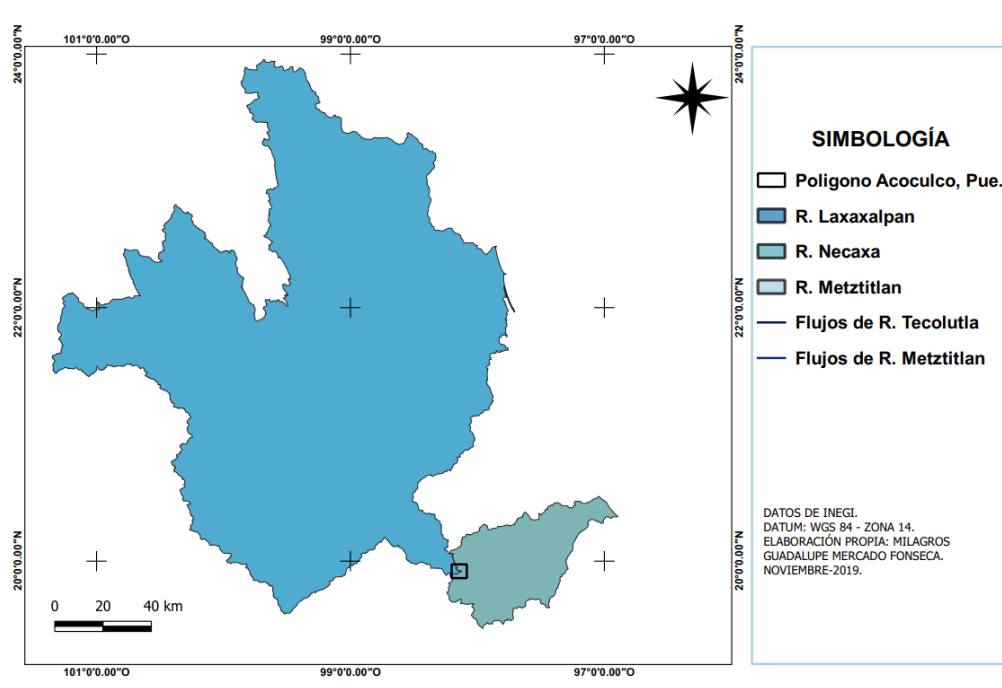
Pous, J., & Jutglar, L. (2004). Energía geotérmica. *Energía Geotérmica*, 1–10.

RACEFN. (1988). Glosario de Geología. In Real Academia De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales. Retrieved from [http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm%5Cnhttp://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm#C](http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm%5Cnhttp://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#C)

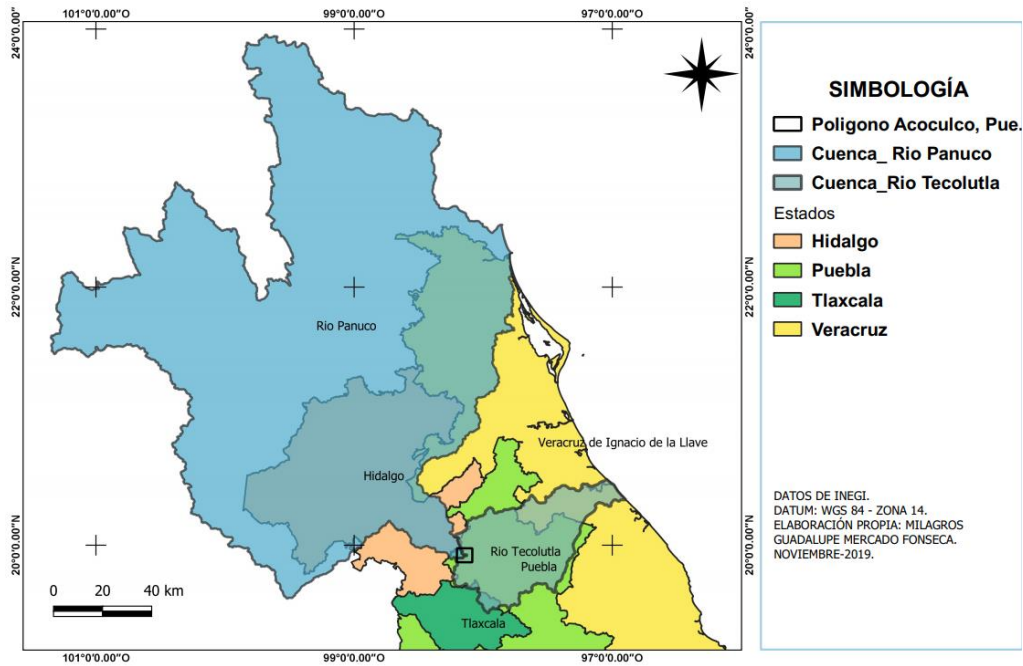
Rafael González -Franco de la Peza, Andrea Cruz-Angón, María Eugenia González Díaz, Gerardo Tapia Hervert, Calor Ignacion Olivera Ávila, E. E. C. R. y D. K. P. R. (2013). Estrategias para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del estado de Puebla.

- Salinas Cruz, E., González Guillén, M. D. J., León Merino, A., & Rodríguez Hernández, R. (2017). La actividad forestal en el desarrollo económico de Chignahuapan, Puebla. *Región Y Sociedad*, 29(69), 1–35.
- Santoyo, E., & Barragan, R. (2010). *Energía Geotérmica.pdf.pdf*. *Ciencia*, 1–12.
- Semarnat. (2013). *Cuencas hidrográficas fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. 1–36.
- Sotelo, R., Gutiérrez, C., Cruz, B., Ortiz, S., & Segura, C. (2008). History and Development of the Classification of Vertisols in the FAO System and Taxonomy. *Terra Latinoamericana*, 26(10), 325–332.
- Schumm S.A. 1956: Evolution of drainage systems and slopes in badlans at Perth-Amboy. New Jersey. *Geo}. Soc. Am. Bull.*, 597-646.
- Tapia Silva, F. O., L. F. E. (2017). Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del Río Tecolutla, México. 1–20.
- Trujano, A. S. S. V. R. M. G. N. A. P. (2016). La Cuenca hidrográfica unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. In *Anales de Ingeniería (Vol. 935)*.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, e I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*. 5: 81–100.
- Verdugo, E. R. (2017). Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico. 1–134.
- Verdugo, E. R. (2017). Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico.
- Windows, M., Corporation, M., Hori, K., & Sakajiri, A. (2011). *La Biodiversidad en Puebla.1 -- 134*.
- World, V. (2004). *Manual de manejo de cuencas*. San Salvador, SV, 107.

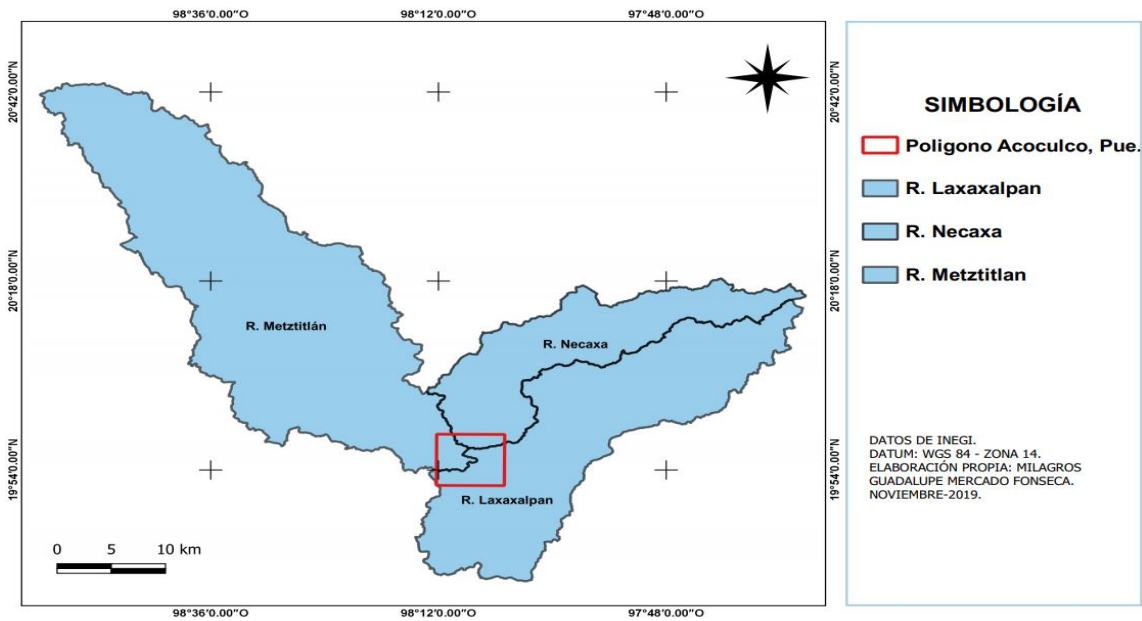
## 10.- ANEXOS.



**Fig 55.-** Muestra las cuencas a macro escala con relación a la zona de estudio.



**Fig 56.-** Muestra las cuencas hidrográficas y los estados en relación con la zona de estudio.



**Fig 57.-** Muestra las subcuencas que están en relación con la zona de estudio.

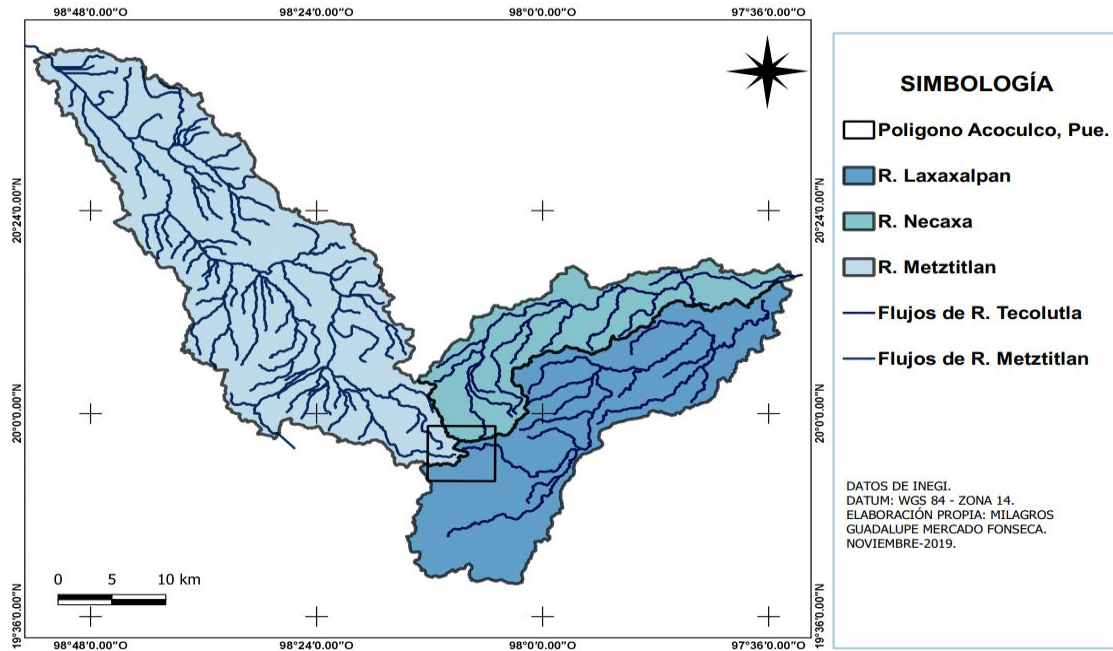


Fig 58.- Muestra las subcuencas y los sistemas de órdenes de cada una.

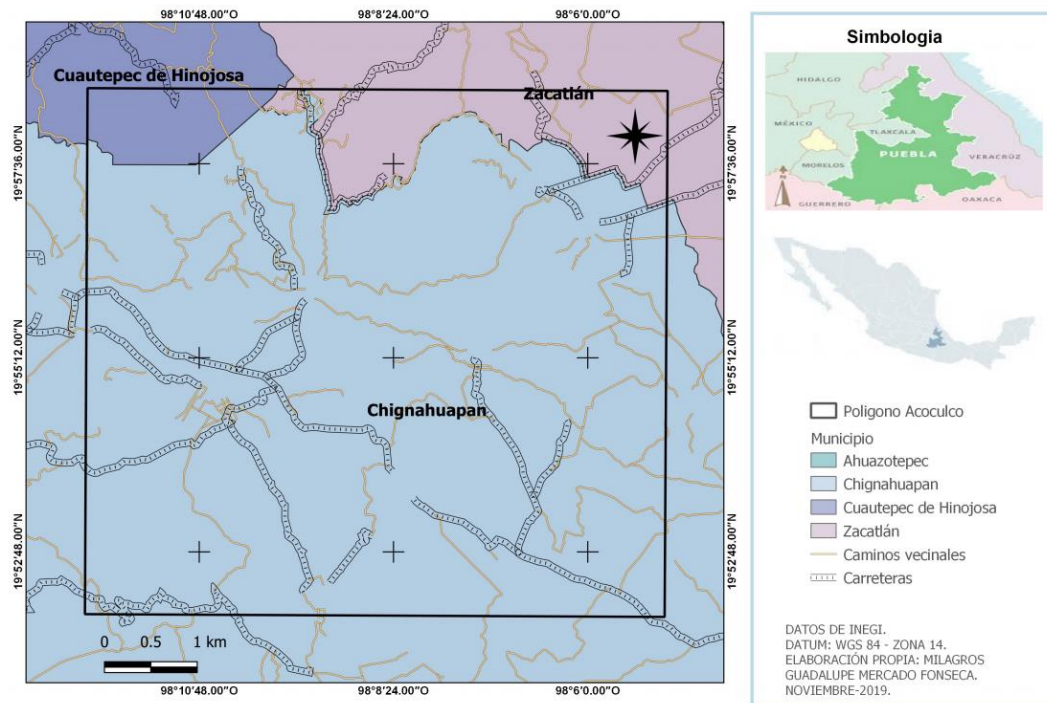
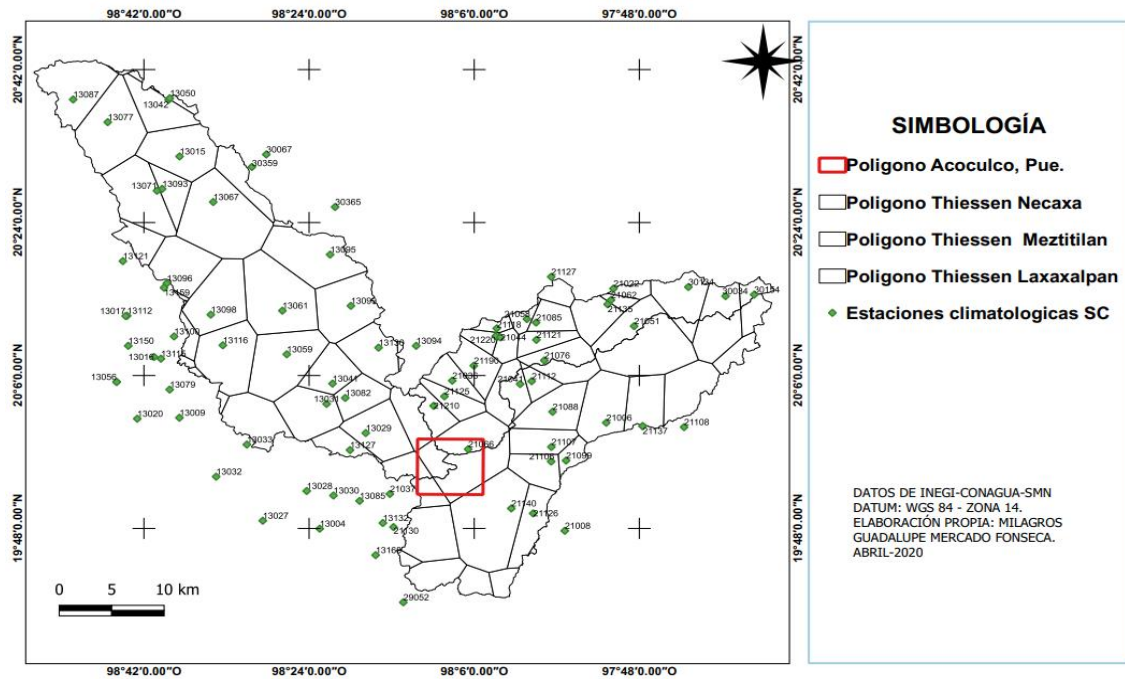
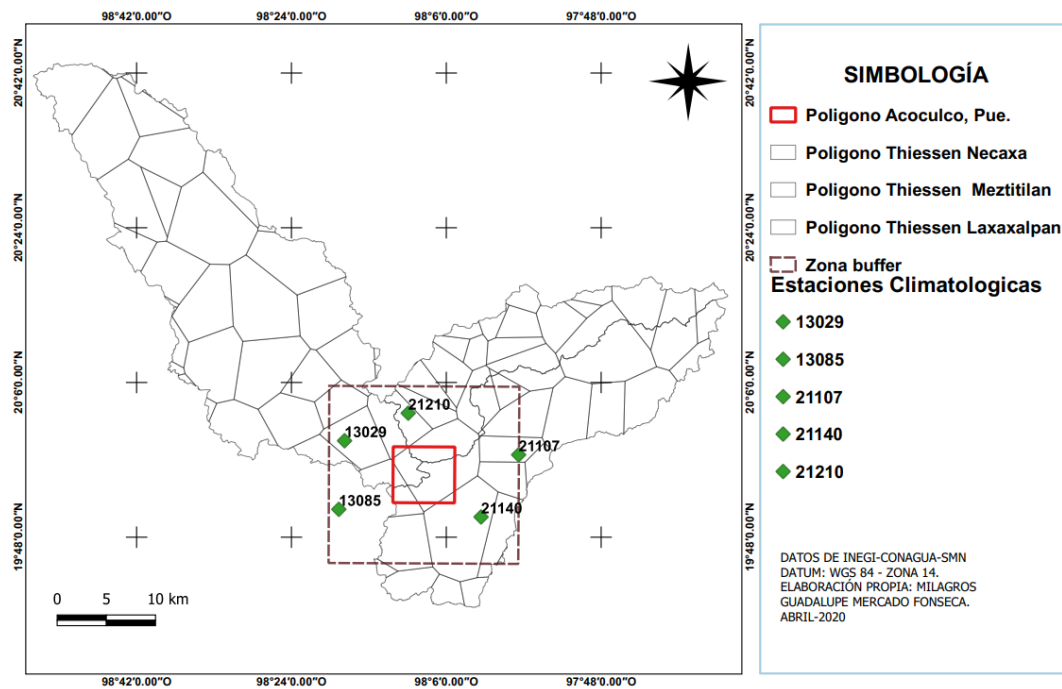


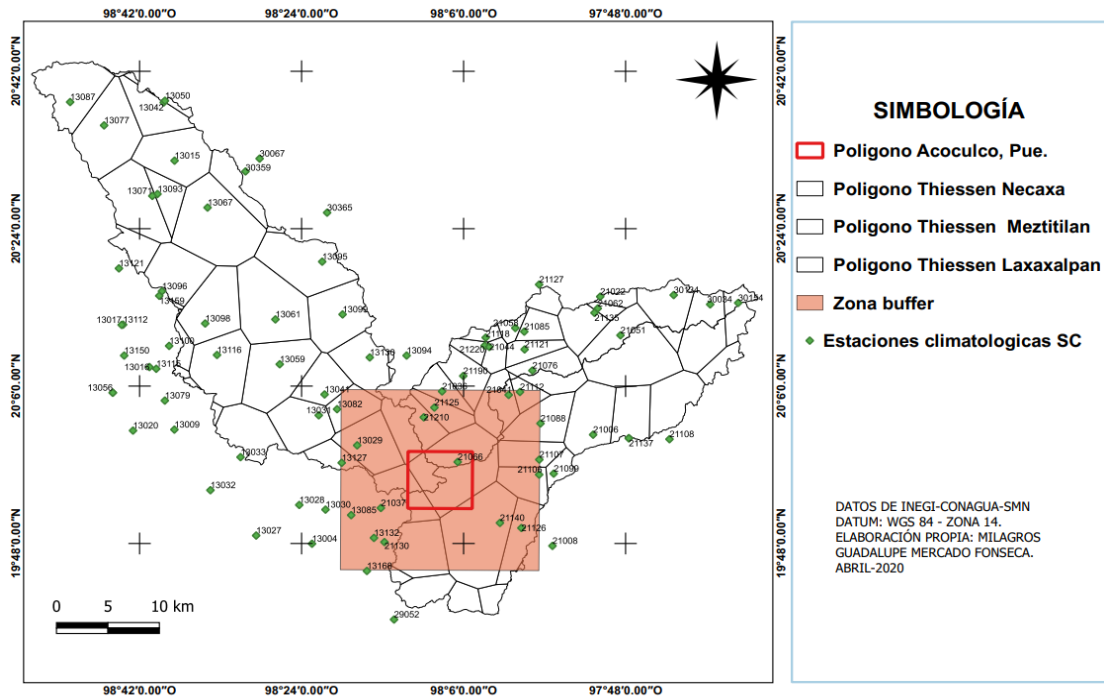
Fig 59.- Muestra la localización de la zona de estudio, camino y carreteras.



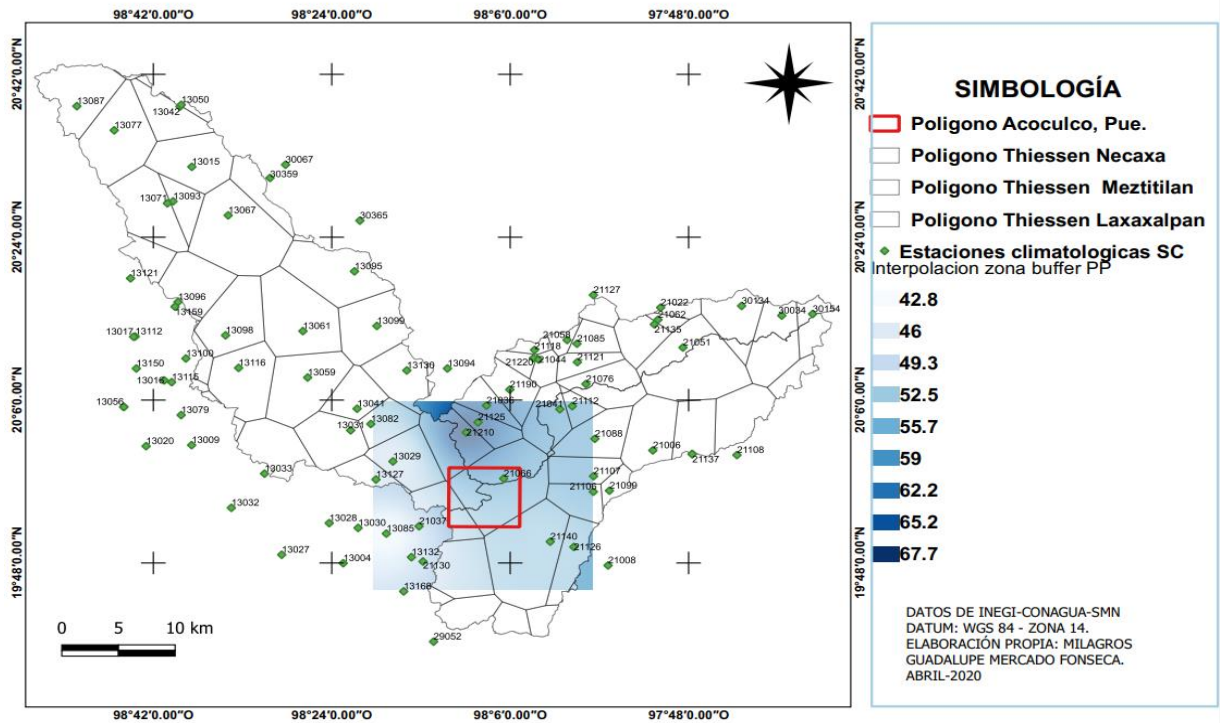
**Fig 60.-** Muestra las estaciones de cada una de las subcuencas.



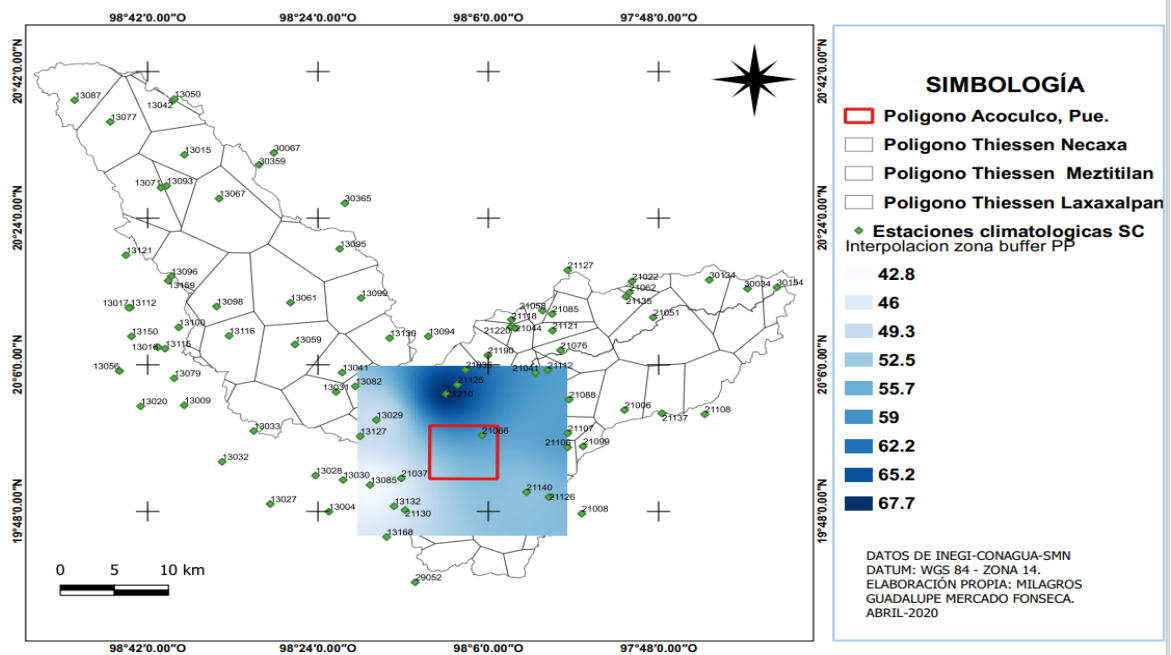
**Fig 61.-** Muestra las estaciones que fueron utilizadas para el análisis de precipitación con relación a la zona de estudio.



**Fig 62.-** Muestra las estaciones de cada una de las subcuencas y la zona buffer, para la realización de interpolación de precipitación y temperaturas.



**Fig 62.-** Muestra las estaciones y la precipitación de la zona según los datos de las estaciones.



**Fig 63.-** Muestra las estaciones e interpolación de precipitación de la zona de estudio, conforme a una zona buffer

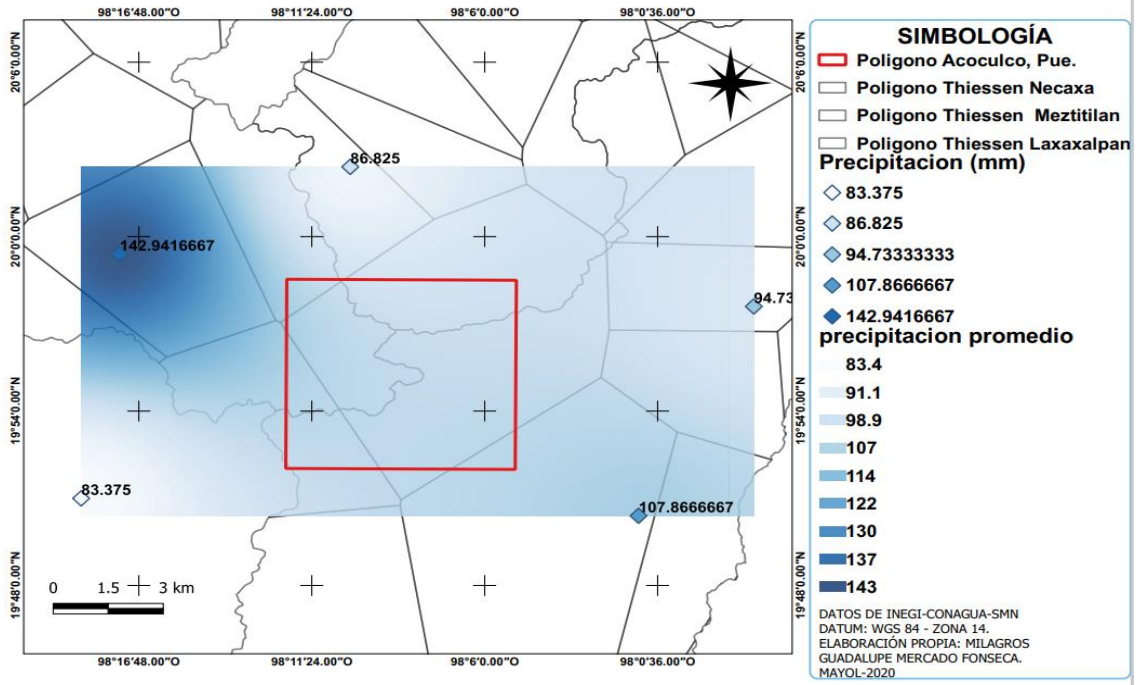


Fig 64- Muestra la precipitación de la zona de estudio.

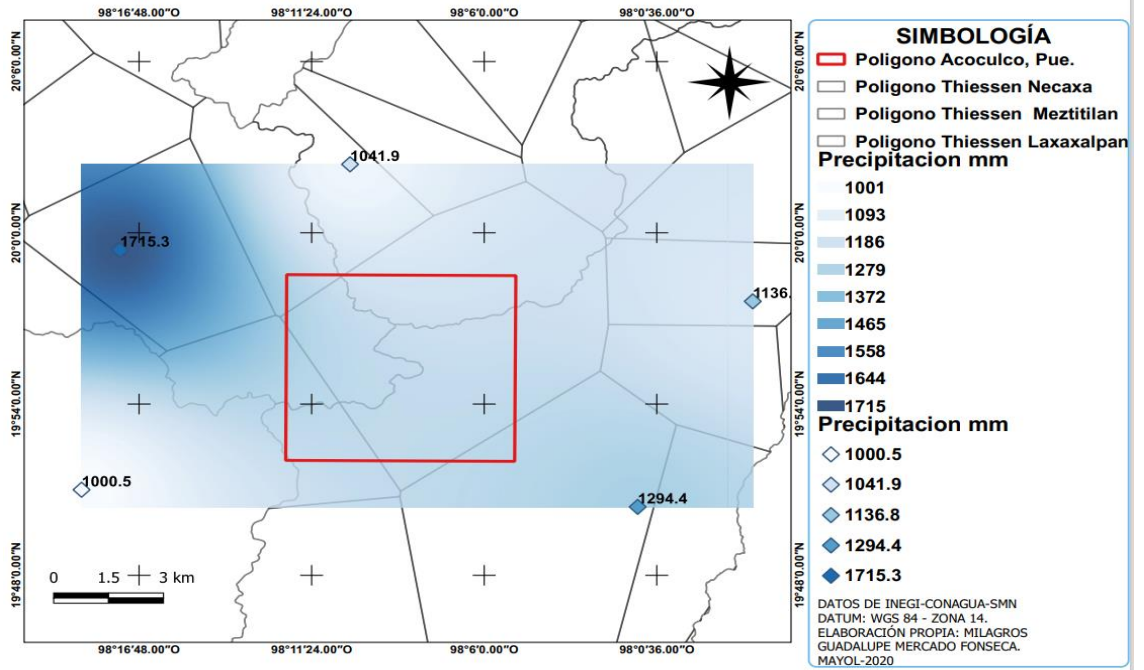


Fig 65.- Muestra la precipitación de la zona de estudio.

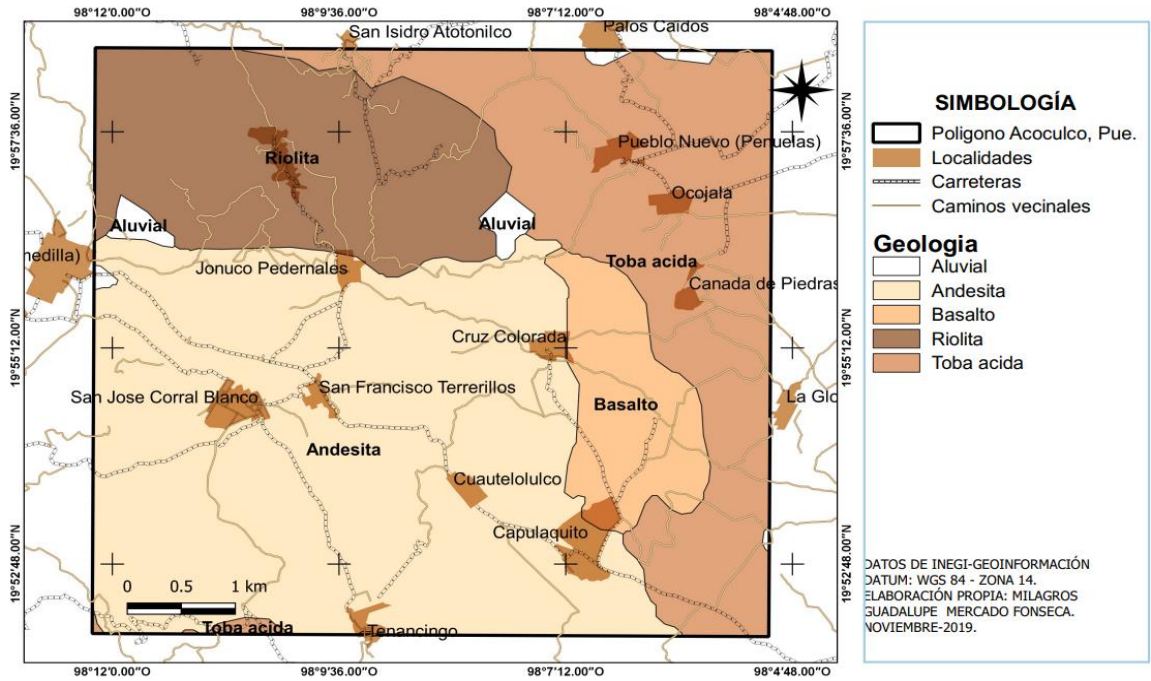


Fig 66.- Muestra la geología de la zona de estudio.

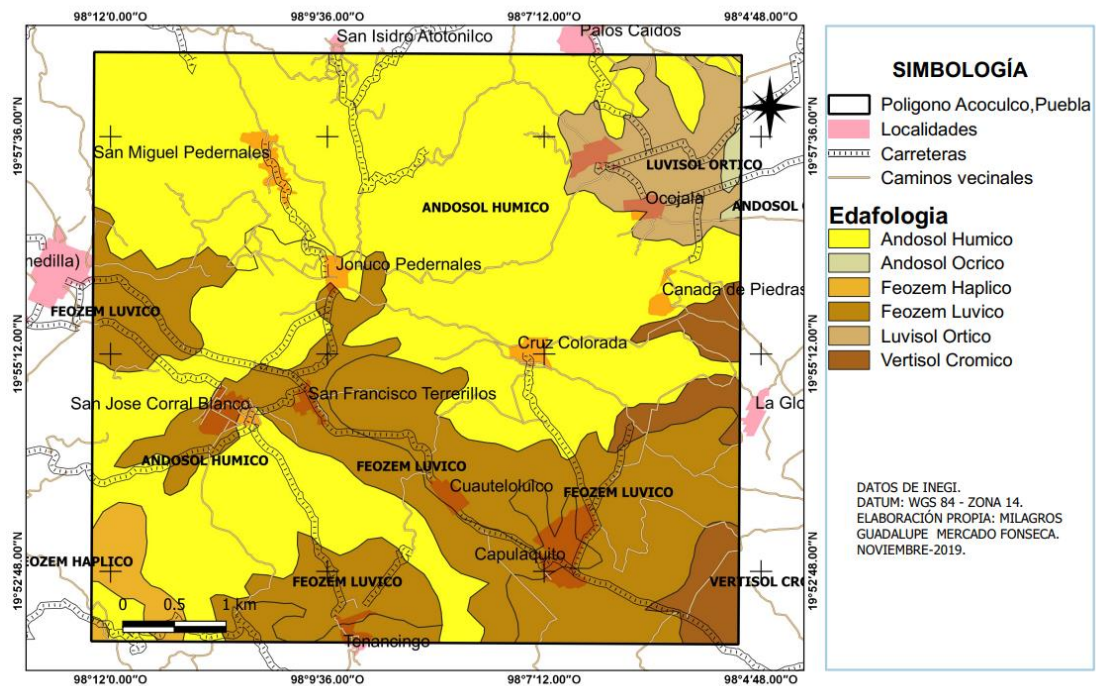
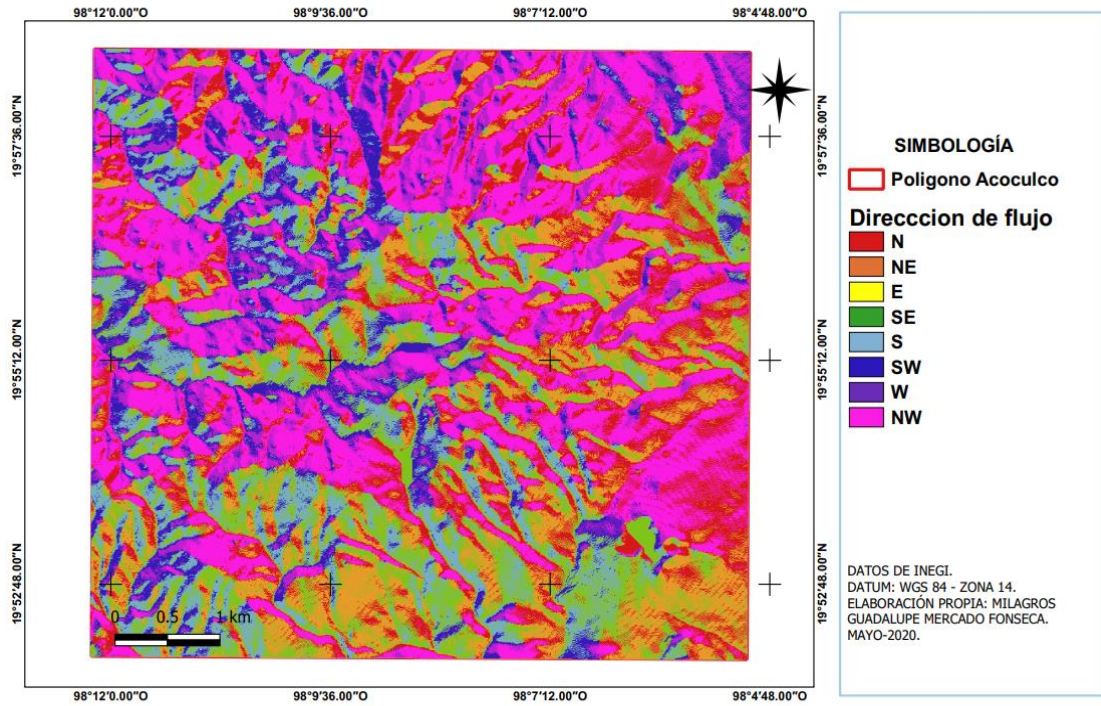
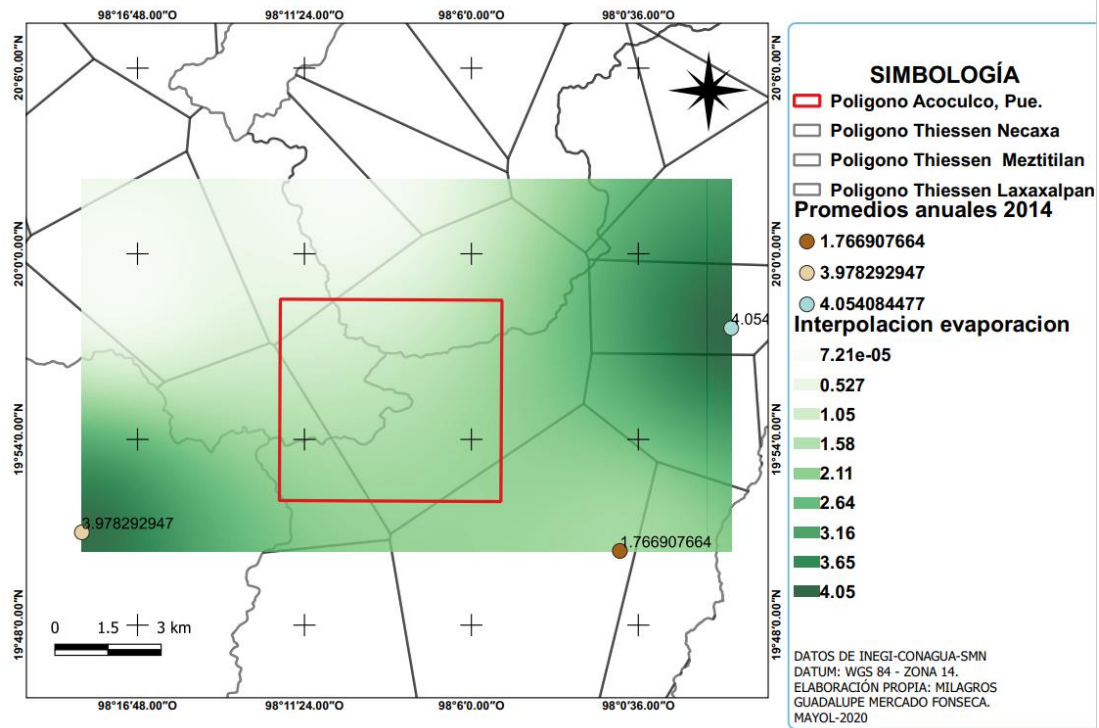


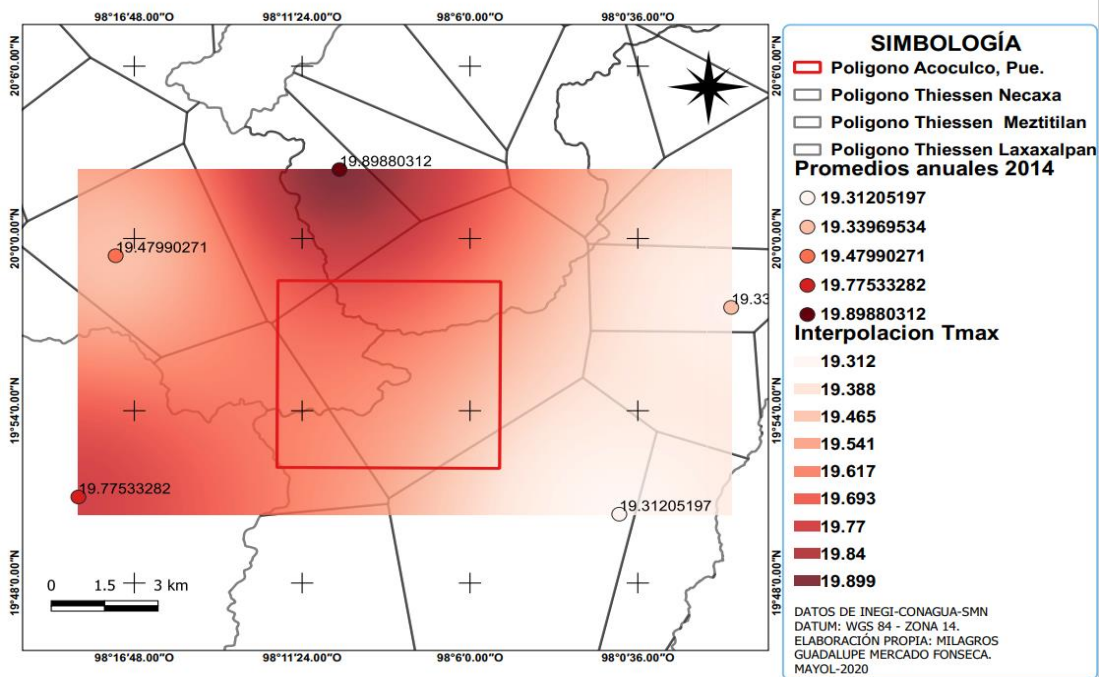
Fig 67.- Muestra los tipos de suelos en la zona de estudio.



**Fig 68.-** Muestra la dirección de los flujos de las subcuencas que convergen en la zona de estudio.



**Fig 69.-** Muestra la evaporación de la zona de estudio, por medio de estaciones.



**Fig 70.-** Muestra las temperaturas máximas en la zona de según datos de las estaciones.

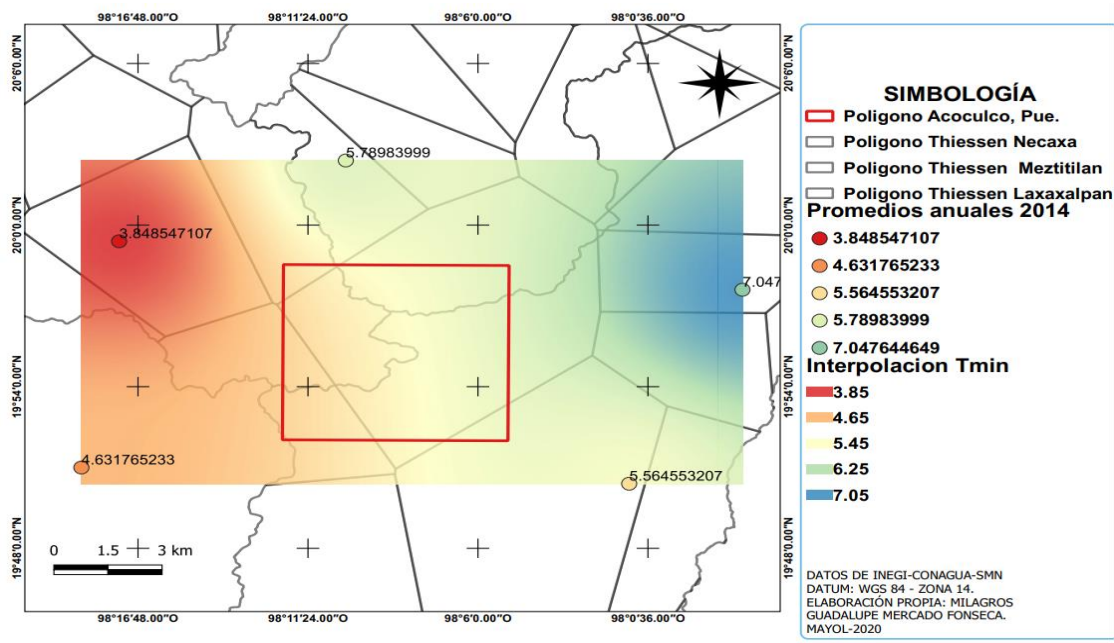


Fig 71.- Muestra las temperaturas mínimas de la zona de estudio, según datos de las estaciones.

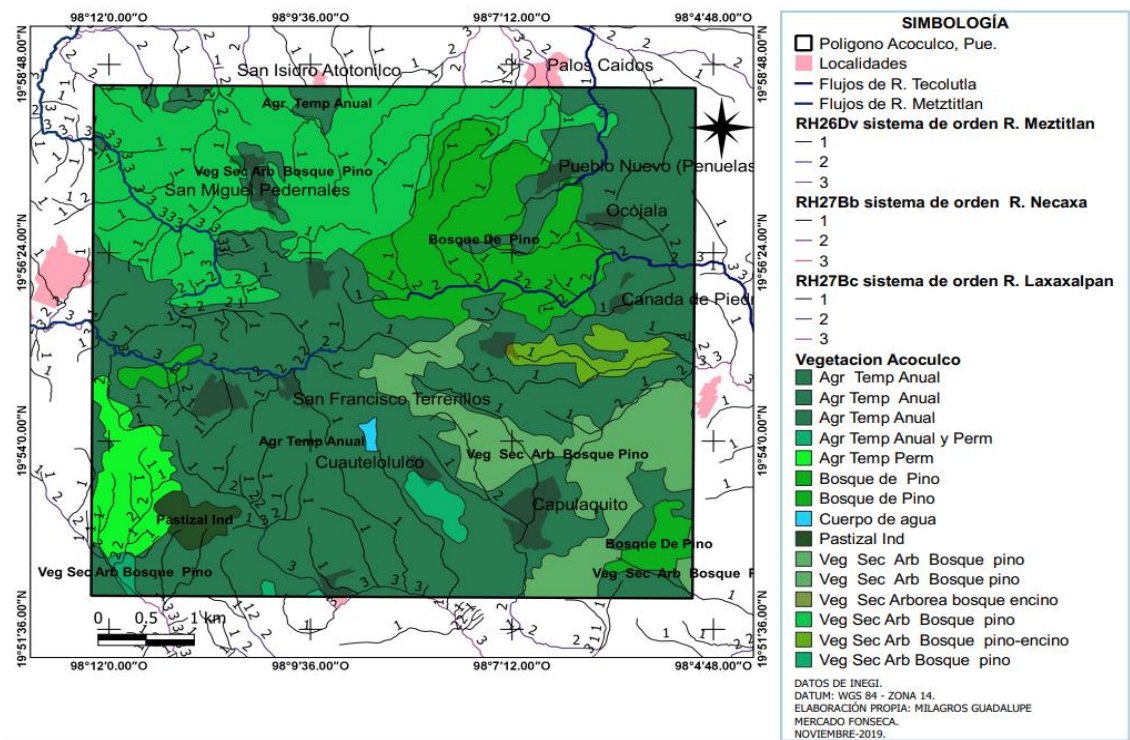
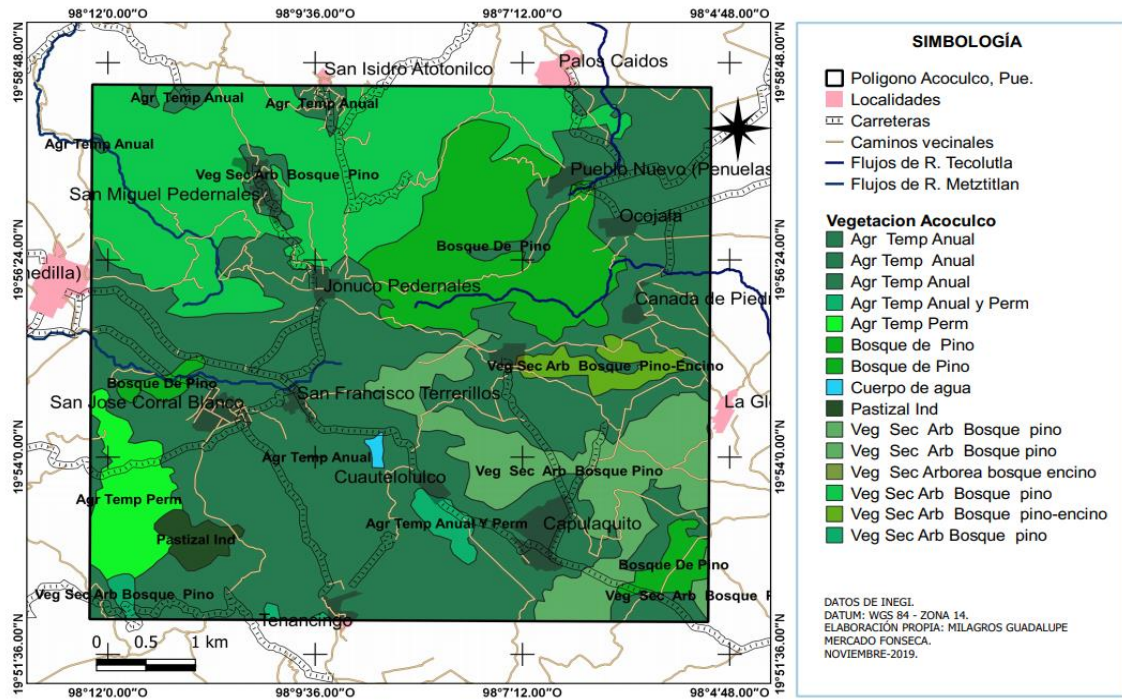
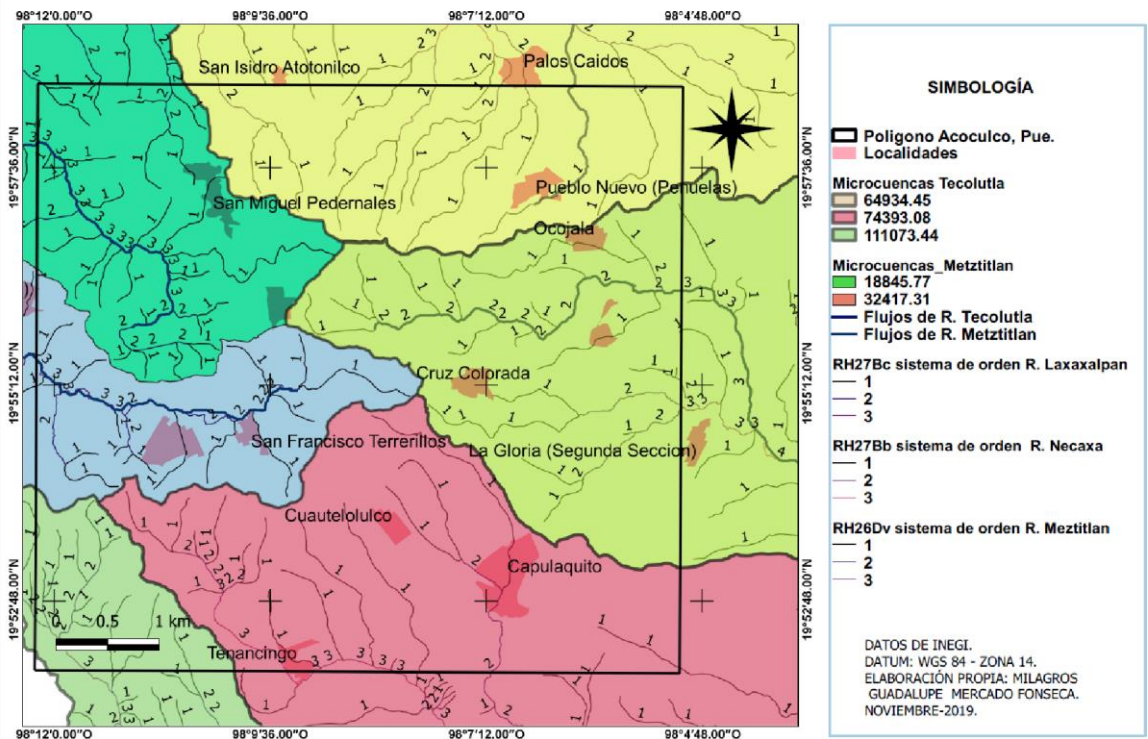


Fig 72.- Muestra los tipos de vegetación que hay en la zona de estudio, así como también la relación con el recurso hídrico.



**Fig 73.-** Muestra los tipos de vegetación de la zona de estudio y los flujos principales de cada una de las subcuencas.



**Figura 74.-** Mapa en el cual se visualiza las microcuencas que entran en la zona de estudio, así como también el sistema de red de la hidrología.

INEGI	Metadato	Clave	DESCRIPCION	Km <sup>2</sup>	Ciclo	Vegetación del ciclo (Km <sup>2</sup> )	% de pérdida o Ganacia	% Serie IV s Serie VI
		TA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL					
1997	2009		Serie I	78.40				
2001	2009		Serie II	88.67	1997-2001	83.54	13.09	
2008	2009		Serie III	80.35	2001-2008	84.51	-9.38	
2009	2009		Serie IV	80.39	2008-2009	80.37	0.04	
2013	2015		Serie V	80.39	2009- 2013	80.39	0.01	
2016	2017		Serie VI	77.64	2013-2016	79.02	-3.42	-5.41
		TAP	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE					
1997	2009		Serie I					
2001	2009		Serie II	1.77	1997-2001			
2008	2009		Serie III	1.23	2001-2008	1.50	-30.49	
2009	2009		Serie IV	1.23	2008-2009	1.23	0.08	
2013	2015		Serie V	1.23	2009- 2013	1.23	0.12	
2016	2017		Serie VI	1.24	2013-2016	1.23	0.05	-17.01
		TP	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE					
1997	2009		Serie I					
2001	2009		Serie II	1.04	1997-2001			
2008	2009		Serie III	4.81	2001-2008	2.93	363.00	
2009	2009		Serie IV	4.75	2008-2009	4.78	-1.22	
2013	2015		Serie V	4.76	2009- 2013	4.76	0.16	
2016	2017		Serie VI	4.76	2013-2016	4.76	-0.04	62.69
		H2O	AGUA					
1997	2009		Serie I					
2001	2009		Serie II	0.20	1997-2001			
2008	2009		Serie III	0.20	2001-2008	0.20	-0.01	
2009	2009		Serie IV	0.20	2008-2009	0.20	-0.01	
2013	2015		Serie V	0.20	2009- 2013	0.20	0.00	
2016	2017		Serie VI	0.20	2013-2016	0.20	-0.05	-0.04
		BP	BOSQUE DE PINO					
1997	2009		Serie I	53.61				
2001	2009		Serie II	47.43	1997-2001	50.52	-11.53	
2008	2009		Serie III	17.03	2001-2008	32.23	-64.10	
2009	2009		Serie IV	17.05	2008-2009	17.04	0.11	
2013	2015		Serie V	17.04	2009- 2013	17.05	-0.02	
2016	2017		Serie VI	17.05	2013-2016	17.05	0.01	-66.26
		PI	PASTIZAL INDUCIDO					
1997	2009		Serie I	1.73				
2001	2009		Serie II	2.53	1997-2001	2.13	46.45	
2008	2009		Serie III	1.34	2001-2008	1.93	-47.15	
2009	2009		Serie IV	1.34	2008-2009	1.34	-0.01	
2013	2015		Serie V	1.34	2009- 2013	1.34	0.00	
2016	2017		Serie VI	1.34	2013-2016	1.34	-0.02	-37.20
		Vs <sub>a</sub> /BP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO					
1997	2009		Serie I	10.55				
2001	2009		Serie II	4.35	1997-2001	7.46	-58.78	
2008	2009		Serie III	42.93	2001-2008	23.64	887.39	
2009	2009		Serie IV	42.93	2008-2009	42.93	0.01	
2013	2015		Serie V	42.92	2009- 2013	42.93	-0.03	
2016	2017		Serie VI	45.11	2013-2016	44.02	5.10	491.03
		Vs <sub>a</sub> /BPQ	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO					
1997	2009		Serie I	1.60				
2001	2009		Serie II	2.77	1997-2001	2.38	73.58	
2008	2009		Serie III	2.20	2001-2008	2.49	-20.43	
2009	2009		Serie IV	2.20	2008-2009	2.20	-0.01	
2013	2015		Serie V	2.20	2009- 2013	2.20	0.00	
2016	2017		Serie VI	2.20	2013-2016	2.20	-0.02	0.95

Tabla VI. - Muestra las pérdidas y ganancias de las actividades de la zona de estudio.

