



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y VULNERABILIDAD
DEL ACUÍFERO HUICHAPAN - TECOZAUTLA, ESTADO DE
HIDALGO”**

Tesis que presenta

María de la Luz Galván Tovar

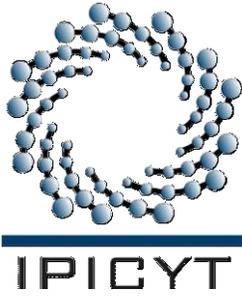
Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Director de la Tesis:

Dr. José Alfredo Ramos Leal

San Luis Potosí, S.L.P., Enero de 2017



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Caracterización hidrogeoquímica y vulnerabilidad del acuífero Huichapan-Tecozautla, Estado de Hidalgo**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **María de la Luz Galván Tovar** y aprobada el **25 de Enero de 2017** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Alfredo Ramos Leal
(Director de la tesis)

Dr. Germán Santacruz de León
(Miembro del Comité Tutorial)

Dr. José Tuxpan Vargas
(Miembro del Comité Tutorial)

Dr. Josué De Lara Bashulto
(Miembro del Comité Tutorial)



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Petrofísica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal.

De igual manera, se realizaron algunas determinaciones en el Laboratorio de Radiactividad Natural del Instituto Geofísica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en el Laboratorio de Aguas Subterráneas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**337207**) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Asimismo, el apoyo brindado al Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Huichapan- Tecozautla.

Acta de examen

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. José Alfredo Ramos Leal Director de mi tesis, por todo el apoyo brindado, sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa con éxito.

Quiero agradecer a mis papas por todo el amor, cariño, comprensión y apoyo incondicional durante toda mi vida y por creer una vez más en la realización de este proyecto. A mis hermanos por brindarme el su apoyo, cariño y ánimo todos los días y momentos difíciles.

Agradezco a los Drs, German Santacruz De León, José Tuxpan Vargas, Josué De Lara Bashulto y. Faustino Juárez Sánchez, por sus comentarios y sugerencias.

Agradezco a Ángeles Urbano, Fermín Villalpando, Uriel Negrete, José Luis Castilla, Martha, Ignacio Paz, Gaby, Nallely Martínez, Janete Moran, Edgar Rojas por su amistad y todo el apoyo brindado a lo largo de este trabajo, particularmente por sus comentarios y valiosas sugerencias que robustecieron esta investigación.

Un agradecimiento especial a los Ings. Marcos Luis León y Enrique Cristino parte del grupo de trabajo del COTAS Huichapan-Tecozautla, quienes apoyaron este proyecto con la finalidad de conocer el estado actual del acuífero.

Me permito hacer de manera extensiva mi agradecimiento a mis amigos y compañeros con los que tuve la oportunidad de convivir en estos dos años de realización de estudios, de los cuales me llevo gratos recuerdos e inolvidables momentos que vivimos en las salidas de campo. Por compartir conmigo un poco de su valioso tiempo y el cual nos permitió de igual manera compartir anécdotas, vivencias, risas, tristezas, desvelos, etc.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	i
Créditos Institucionales	ii
Acta de examen	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Resumen	xii
Abstract	xiv
1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	2
1.2.1 Objetivos Específicos	2
1.3 Justificación	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Antecedentes	3
1.6 Área de Estudio	5
1.6.1 Localización	5
1.6.2 Clima	5
1.6.3 Flora y Fauna	8
1.6.4 Relieve y Tipo de Suelo	9
1.6.5 Hidrografía	10
2. MARCO HIDROGEOLOGICO	11
2.1 Geología	12
2.1.1 Sistema Cretácico	12
2.1.1 a Formación El Doctor	13
2.1.1b Formación Soyatal	13
2.1.2 Sistema Terciario	14
2.1.2 a Rocas Volcánicas	14

2.2 Hidrogeología	15
2.3 Modelo Conceptual	18
2.3.1 Secciones Hidrogeológicas	19
3. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO	23
3.1 Hidrogeoquímica	23
3.1.1 Técnicas Analíticas	23
3.1.1 a Análisis de Cationes	25
3.1.1 b Análisis de Aniones	27
3.1.2 Diagramas Hidrogeoquímicos	28
3.2.2 a Diagrama de Piper	29
3.1.2 b Diagramas de STIFF	29
3.1.2 c Diagramas de Dispersión	30
2.1.2 d Diagrama de Gibbs	30
3.1.2 e Diagrama de Mifflin	31
3.2 Calidad del Agua	32
3.2.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994	32
3.2.1. a Límites Permisibles de Características Químicas.	33
3.2.2 Índice de Calidad del Agua para Consumo Humano (ICA)	33
3.2.3 Índice de Contaminación (ICON)	35
3.2.4 Calidad del Agua para Riego	36
3.2.4 a Condición de sodicidad	36
3.2.4 b Relación de adsorción de sodio (RAS)	36
3.2.4 c Diagrama para la clasificación del agua de riego	37
3.2.4 d Porcentaje de Sodio (%Na)	39
3.2.4 e Diagrama de Wilcox (%Na vs CE)	39
3.2.4 f Relación de Kelly	40
3.3 Vulnerabilidad Acuífera	40
3.3.1 Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos con SINTACS	41

3.3.1 a (S) Profundidad del agua	43
3.3.1 b (I) Infiltración eficaz	44
3.3.1 c (N) Zona No Saturada	45
3.3.1 d (T) Tipo de Suelo	46
3.3.1 e (A) Características Hidrogeológicas del Acuífero	47
3.3.1 f (C) Conductividad Hidráulica del Acuífero	47
3.3.1 g (S) Pendiente de la Superficie Topográfica	48
3.3.2 Normalización de la Vulnerabilidad	49
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	51
4.1 Diagramas Hidrogeoquímicos	51
4.1.1 Diagramas de Stiff	51
4.1.2 Diagrama de Piper	53
4.1.3 Diagrama de Gibbs	54
4.1.4 Diagramas Ternarios	54
4.1.5 Diagrama de Mifflin	55
4.1.6 Diagramas de Dispersión	57
4.1.7 Perfil Hidrogeoquímico	59
4.2 Calidad del Agua	61
4.2.1 NOM 127-SSA1-1994	61
4.2.2 Índice de Calidad del Agua (ICA)	61
4.2.3 Índice de Contaminación (ICON)	63
4.2.4 Calidad del agua para riego	64
4.3 Vulnerabilidad Acuífera	67
4.3.1 (S) Profundidad del Agua	67
4.3.2 (I) Infiltración Eficaz	68
4.3.3 (N) Zona No Saturada	69
4.3.4 (T) Tipo de Suelo	70
4.3.5 (A) Características Hidrogeológicas del Acuífero	71
4.3.6 (C) Conductividad Hidráulica del Acuífero	72

4.3.7 (S) Pendiente de la Superficie Topográfica	73
4.3.8 Índice de Vulnerabilidad Normalizada	74
5. CONCLUSIONES	77
6. RECOMENDACIONES	78
7. BIBLIOGRAFÍA	79

Lista de tablas

Tabla 1.1 Estaciones climatológicas de la cuenca Huichapan-Tecoautla	6
Tabla 3.1 Muestras de que representan características físicas y organolépticas fuera de los límites permisibles.	33
Tabla 3.2 Clasificación de la constante “K” en relación de las características físicas y organolépticas del agua.	34
Tabla 3.3 Clasificación del índice de calidad del agua modificada de Fernández, 2009 y Martínez, 1979.	34
Tabla 3.4 Clasificación del agua según el índice del ICON	35
Tabla 3.5 Clasificación del riesgo de salinidad en el agua de riego	38
Tabla 3.6 Clasificación para conductividad eléctrica y porcentaje de sodio.	40
Tabla 3.7 Clasificación de la relación Kelly en el agua de riego	40
Tabla 3.8: Parámetros del método SINTACS	42
Tabla 3.9 Valores de peso asignado a cada parámetro en función de cada condición específica	49
Tabla 4.1 Clasificación del ICA en las muestras colectadas	63
Tabla 4.2 Resultados del ICON para las muestras analizadas	63

Lista de figuras

Figura 1.1 Localización de la zona de estudio y principales municipios	5
Figura 1.2 Isoyetas medias anuales (mm) y ubicación de estaciones climatológicas	7
Figura 1.3 Isotermas medias anuales (°C) en el área de estudio	8
Figura 1.4 Flora y fauna presentes en la región	9
Figura 1.5 Uso del suelo en la cuenca Huichapan-Tecoautla	10
Figura 1.6 Hidrografía de la cuenca Huichapan-Tecoautla	11
Figura 2.1 Geología de la zona de estudio y principales alineamientos estructurales	16
Figura 2.2 Mapa de elevación de nivel estático y direcciones de flujo en cuenca Huichapan-Tecoautla	17
Figura 2.3 Localización de secciones hidrogeológicas en el área de estudio	19
Figura 2.4 Sección hidrogeológica A-A´ y principales sistemas de flujo	20
Figura 2.5 Sección hidrogeológica B-B´ y principales sistemas de flujo	20
Figura 2.6 Sección hidrogeológica C-C´ y principales sistemas de flujo	21
Figura 2.7 Sección hidrogeológica D-D´ y principales sistemas de flujo	21
Figura 2.8 Sección hidrogeológica E-E´ y principales sistemas de flujo	22
Figura 3.1 Distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio	23
Figura 3.2 Medición de parámetros físicos y colecta de muestras de agua en pozos y manantiales	24
Figura 3.3 Espectro de plasma 400 (ICP)	25
Figura 3.4 Calibración de ICP para determinación de cationes mayoritarios	27
Figura 3.5 Determinación de aniones con el colorímetro SMART 2	28
Figura 3.6 Determinación de alcalinidad	28
Figura 3.7 Ejemplo de diagrama de Piper	29

Figura 3.8 Diagramas de STIFF	30
Figura 3.9 Diagrama de Gibbs	31
Figura 3.10 Diagrama de Mifflin	32
Figura 3.11 Diagrama para la clasificación de salinidad para riego	38
Figura 3.12 Diagrama de Wilcox	39
Figura 3.13 Profundidad del agua	44
Figura 3.14 Infiltración eficaz	45
Figura 3.15 Zona no saturada	46
Figura 3.16 Tipo de suelo	46
Figura 3.17 Características hidrogeológicas del acuífero	47
Figura 3.18 Conductividad Hidráulica	48
Figura 3.19 Pendiente de la superficie topográfica	48
Figura 3.20 Grados de vulnerabilidad porcentualizados para el índice SINTACS	50
Figura 4.1 Mapa de distribución de los diagramas de STIFF	52
Figura 4.2 Tipos de agua y su distribución en la zona de recarga y descarga	52
Figura 4.3 Diagrama de Piper, en el que muestra los procesos hidrogeoquímicos de mezcla e intercambio iónico	53
Figura 4.4 Diagramas de Gibbs, en donde el principal proceso es el de interacción agua roca	54
Figura 4.5 Diagramas ternarios en el que se representa el proceso de intercambio ionio y el la solución de albita	55
Figura 4.6 En el diagrama de Mifflin se tienen tres tipos de flujo, el local, intermedio y regional	56
Figura 4.7 Distribución espacial de los tipos de flujos del agua subterránea	56
Figura 4.8 Diagramas de dispersión a) $\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}$ vs $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ y b) HCO_3+SO_4 vs $\text{Ca}+\text{Mg}$	57
Figura 4.9 Diagramas de dispersión a) Cl vs CE y b) Na vs Cl .	58
Figura 4.10 Distribución de la temperatura del agua subterránea	59

Figura 4.11 Perfil hidrogeoquímico e hidrogeológico de SE-NW	60
Figura 4.12 Mapa del Índice de calidad del agua (ICA)	62
Figura 4.13 Mapa de distribución del Índice de Contaminación (ICON)	64
Figura 4.14 Clasificación de las aguas para uso agrícola	65
Figura 4.15 Diagrama de Wilcox de las muestras de agua subterránea	66
Figura 4.16 Relación de Kelly de las muestras de agua subterránea	66
Figura 4.17 Profundidad del nivel estático (S) y su índice de vulnerabilidad asociado	68
Figura 4.18 Infiltración eficaz (I) y su índice de vulnerabilidad asociado	69
Figura 4.19 Unidades geológicas de la zona no saturada (N) e índices de vulnerabilidad asociado.	70
Figura 4.20 Tipo de suelo (T) e índices de vulnerabilidad asociado	71
Figura 4.21 Unidades Hidrogeológicas (A) e índice de vulnerabilidad asociado	72
Figura 4.22 Unidades hidrogeológicas y su Conductividad hidráulica (C) asociada	73
Figura 4.23 Superficie topográfica (S) y su índice de vulnerabilidad asociado	74
Figura 4.24 Mapa de vulnerabilidad con el método SINTACS Normalizado, representando las zonas más vulnerables a las actividades agrícolas y fuentes contaminantes más importantes	75

Resumen

Caracterización Hidrogeoquímica y Vulnerabilidad del Acuífero Huichapan-Tecoautla, Estado de Hidalgo

PALABRAS CLAVE. ICA, calidad del agua, SINTACS, hidrotermalismo, hidrogeología, sistemas de flujo.

El acuífero Huichapan Tecozautla se encuentra ubicado en los municipios del mismo nombre en el Estado de Hidalgo. La problemática que se tiene es el abastecimiento de agua, debido a que se ha acentuado la escasez en las poblaciones, por lo que con mayor frecuencia, las fuentes de agua, son subterráneas y estas se encuentran sobreexplotadas y de mala calidad, causando conos de abatimiento. El sistema acuífero, está conformado por dos acuíferos, uno superior constituido por materiales volcánicos fracturados, que es el que se encuentra en desarrollo. El acuífero profundo se encuentra constituido por calizas de la Formación El Doctor, no está siendo explotado. En este trabajo se realizó una caracterización hidrogeoquímica de las 45 muestras de agua tomadas de pozos y manantiales, los cuales se representaron a través de diferentes diagramas. Se obtuvo la evaluación de la calidad del agua, en la que se consideraron algunos aspectos de la NOM-127-SSA1-1994 e índices de calidad de agua para consumo humano y uso agrícola. Por último, para el análisis de la vulnerabilidad acuífera se aplicó la metodología "SINTACS". Los resultados obtenidos de esta investigación, indican que predominan dos tipos de agua, la bicarbonatada sódica (asociada a la zona de descarga) y la bicarbonatada cálcica (asociada a la zona de recarga); el principal proceso hidrogeoquímico es la interacción agua-roca, mezcla y en algunas muestras se presenta el efecto de evaporación. Se identificaron tres tipos de flujo, a) el flujo local asociado a la zona de recarga.; b) el flujo regional en donde se encuentran las aguas más evolucionadas localizadas al norte del área de estudio y

c) el flujo intermedio, ubicadas en Tecozautla muy cercanas al flujo regional. La actividad hidrotermal es una componente importante en el funcionamiento para el sistema acuífero Huichapan-Tecozautla, debido a que aporta volúmenes importantes al sistema. El índice de calidad del agua (ICA) para consumo humano, indica que la calidad es aceptable y el índice de contaminación (ICON) muestra que no tiene problemas de contaminación, hasta el momento. En general, la calidad para uso agrícola es aceptable. La vulnerabilidad acuífera muestra que las zonas con mayor riesgo a ser vulnerables son: la zona de recarga en Huichapan y en la parte Este de Tecozautla que es donde se encuentran los ríos Tula, San Juan, Tecozautla y San Francisco; así como, la presa de Zimapán con problemas de contaminación.

Abstract

Hydrogeochemical Characterization and Vulnerability of the Huichapan-Tecoautla Aquifer, Hidalgo State

KEYWORDS. ICA, water quality, SINTACS, hydrothermalism, hydrogeology, flow systems.

The Huichapan Tecoautla aquifer is located in the municipalities of the same name in the State of Hidalgo. There is a problem of water supply that is reflected in water scarcity in the human population, so that more frequently the water sources used are underground, with problems of overexploitation and poor water quality, causing cones of dumping.

The aquifer system consists of two aquifers, an upper one consisting of fractured volcanic materials that is in development. And the deep aquifer is constituted by limestones of the El Doctor Formation, this aquifer is not being exploited.

In this work a hydrogeochemical characterization of the 45 water samples from wells and springs was performed, which were represented by different diagrams. The water quality assessment was performed, in which aspects of NOM-127-SSA1-1994 and water quality indexes for human consumption and agricultural use were considered. Finally, the "SINTACS" methodology was applied for the analysis of the water vulnerability.

The results obtained from this research indicate that two types of water predominate: sodium bicarbonate (associated with the discharge zone) and calcium bicarbonate (associated with the recharge zone); the main hydrogeochemical process is the water-rock interaction, mixing and in some samples the evaporation effect is present. Three types of flow were identified: a) the local flow associated with the recharge zone; B) the regional flow where the most evolved waters are located north of the study area and c) the intermediate flow, located in Tecoautla very close to the

regional flow. The hydrothermal activity is an important component in the operation for the Huichapan-Tecoautla aquifer system, as it contributes important volumes to the system. The water quality index (ICA) for human consumption indicates acceptable quality and pollution index. (ICON) shows, which for now, has no pollution problems. In general, the quality for agricultural use is acceptable. The aquifer vulnerability shows that the areas at greatest risk to be vulnerable are: the recharge zone in Huichapan and the eastern part of Tecozautla, where the Tula, San Juan, Tecozautla and San Francisco rivers are located; As well as, the dam of Zimapan with pollution problems.

1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

El agua es de vital importancia para la vida en el planeta. Su disponibilidad depende del estado de equilibrio en el ciclo hidrológico; así como, de su calidad, dependiendo de sus características físicas y químicas limitará su uso. Durante su movimiento en el ciclo hidrológico, el agua puede ser interrumpida debido a la actividad antropogénica en zonas agrícolas y áreas urbanas. En ocasiones la extracción del agua puede ser tan importante que rompe las condiciones de equilibrio del sistema, ocasionando descensos en los niveles piezométricos y en ocasiones conos de abatimiento. Para conocer su funcionamiento se pueden utilizar técnicas hidrogeoquímicas e hidrogeológicas que pueden brindarnos una mayor información sobre la evolución del agua subterránea.

Para conocer el origen y la evolución del agua subterránea, se realiza una caracterización hidrogeoquímica apoyándonos a través de diferentes diagramas como Piper, Stiff, Mifflin y de dispersión, los cuales permiten describir los tipos de agua, su evolución y diferentes procesos como los de mezcla e interacción por el medio con el que está en contacto. En condiciones naturales, la composición química del agua subterránea depende de su evolución y su interacción por el medio por el cual circula. Sin embargo, esta puede verse afectada por la actividad antropogénica.

Para evaluar el riesgo de que el agua subterránea sea contaminada se determina la vulnerabilidad acuífera. Para lo cual se establecen medidas de seguridad y así evitar la contaminación del acuífero. Existen diversas metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo ambiental (Ramos, 2002); estos pueden ser de dos tipos: Sistemas numéricos (en los que se utilizan cálculos) como: Acuífero Vulnerability Index (AVI), Depth Recharge Acuífero Soil Topografía Impact of Vadose

Zone Conductivity Hydraulic (DRASTIC), Environmental Risk Inventory System (ERIS), Site Rating Methodology (SRM) y Soggiacenza Infiltrazione efficace Non saturo Tipologia della copertura Acquifero Conducibilità idraulica dell' acuífero acclività della Superficie topografica (SINTACS). Sistemas no numéricos, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables

En este trabajo se utilizó el método SINTACS, para establecer los niveles de vulnerabilidad en la zona de estudio que comprende el municipio de Tecozautla y Huichapan.

1.2 Objetivo General

Determinar la influencia del hidrotermalismo en el sistema acuífero de Huichapan-Tecozautla; así como, los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua subterránea.

1.2.1 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea.
- ✓ Establecer la evolución del agua subterránea.
- ✓ Determinar la calidad del agua para uso potable y agrícola.
- ✓ Establecer el modelo conceptual del sistema acuífero.
- ✓ Determinar la vulnerabilidad acuífera.

1.3 Justificación

En muchos lugares en los que se administra y distribuye el agua se han preocupado solo por conocer la cantidad de agua existente y se ha dejado de lado la calidad del recurso. Por lo que, determinar de las características físico-químicas del agua permitirá conocer los procesos y el funcionamiento del sistema acuífero. Asimismo, hay evidencia de termalismo; sin embargo, se desconoce el impacto que tiene en el agua subterránea de la región.

Por otro lado, se desconoce el impacto de las actividades antropogénicas al agua subterránea, debido a esto es necesario evaluar la vulnerabilidad acuífera del sistema.

1.4 Hipótesis

Dado que la caldera de Huichapan se encuentra al sureste de los límites del área de estudio, en la zona de recarga, es posible que la influencia hidrotermal asociada a esta estructura afecte al sistema acuífero de Huichapan-Tecozautla. Por lo cual un es importante estudiar el efecto que tiene el hidrotermalismo.

La caracterización hidrogeoquímica permitirá saber sobre el origen del agua subterránea en el sistema acuífero.

1.5 Antecedentes

La zona de Huichapan Tecozautla ha sido motivo de numerosos estudios, la mayoría enfocado desde el punto de vista de la prospección geoelectrica resistiva, con la finalidad de determinar la viabilidad de perforación de pozos. Sin embargo, se dejó de lado estudiar las características químicas del agua presentes en la región y el papel que juega el termalismo en la región. Así mismo, dentro de la zona de

estudio no se ha realizado ningún estudio sobre vulnerabilidad acuífera (Lesser, 2007).

A continuación se describirán de manera general los estudios que se han realizado:

- ❖ 1970-1973 – Se realizaron dos estudios, que consistieron de un perfil térmico y geoelectrónico resistivos.
- ❖ 1974, GEOFIMEX realizó un estudio de prospección geofísica en la zona de Huichapan-San José Atlán, con finalidad de investigación.
- ❖ En 1978 la compañía GEOCALLI realizó un trabajo geohidrológico, que cubrió una parte de 1100 km² aproximadamente, incluyendo hacia el sur parte del municipio de Nopala, el estudio considero aspectos piezométricos y pruebas de bombeo, así como, recomendaciones para exploración y explotación.
- ❖ En 1986 se realizó un estudio geoelectrónico en Jonacapa, en el cual describen la presencia de rocas ígneas extrusivas básicas, intermedias y ácidas.
- ❖ En 1988 se realizó un estudio geohidrológico para el Valle de Huichapan, en el que se incluye a la caldera El Astillero, enfocado al abastecimiento de agua para la población.
- ❖ En 1990, GEOFIMEX SA, realizó un estudio de prospección geoelectrónicas que abarco 14 zonas con el propósito de abastecer agua a Huichapan y poblados vecinos. De igual manera realizó otros estudios en las zonas de Ninthí, Apartadero y El Tendido.
- ❖ En 1990 la empresa Exploraciones Coordinadas realizó una exploración Geofísica de tipo resistiva, para diversas zonas del estado de Hidalgo.
- ❖ En 1993, la empresa Sistemas y Proyectos Futura SA de CV, realiza trabajos de piezometría en los valles de Huichapan y Tecozautla.
- ❖ En 1996, la Empresa Lesser y Asociados realizó un estudio geohidrológico que abarca desde Nopala a Tecozautla, al parecer enfocado a dotar de agua al poblado de Nopala.
- ❖ En 2006, nuevamente la Empresa Lesser y Asociados realizó la actualización del geohidrológico.

1.6 Área de Estudio

1.6.1 Localización

La zona de estudio se localiza en la porción occidental del Estado de Hidalgo entre los paralelos 20°15' y 20°40' de latitud norte y los meridianos 99°29' y 99°47' de longitud oeste; y comprende un área 1909 km² y los límites del estado de Querétaro y Estado de México. Las principales poblaciones son Huichapan, Tecozautla y Nopala de Villagrán, las que corresponden a cabeceras municipales y algunos otros municipios como Chapantongo; una parte del municipio de Tequisquiapan en Querétaro. En la Figura 1.1 se muestra la localización regional y local de la zona estudiada.

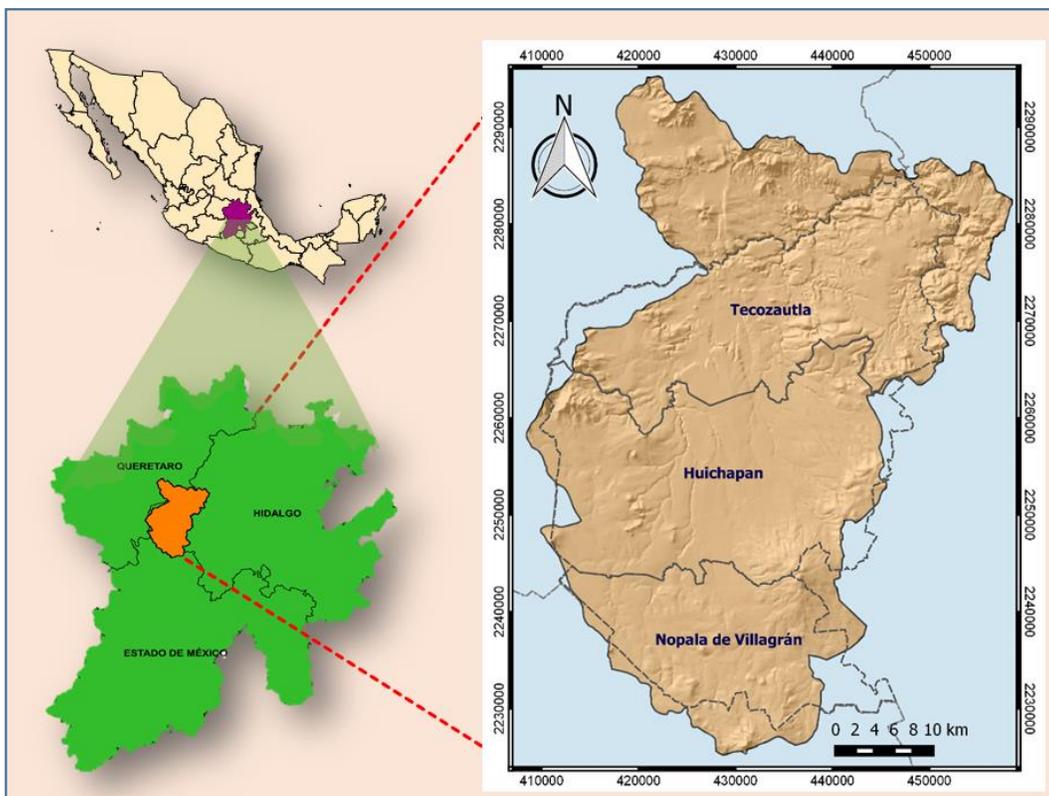


Figura 1.1 Localización de la zona de estudio y principales municipios.

1.6.2 Clima

El clima presente en la región de estudio comprendido por los municipios de Tecozautla en la parte norte, Huichapan en el centro y Nopala de Villagrán al sur. En la porción central del área de trabajo, corresponde a un clima semiseco, templado. Hacia norte, el clima se modifica ligeramente para un clima semiseco, semicálido, mientras que en la porción sur, en el área de los Cerros de Nopala y El Astillero, el clima es de tipo templado, subhúmedo, con lluvias en verano.

De acuerdo a los datos obtenidos de las estaciones climatológicas con un periodo de datos desde 1951 hasta 2010, la precipitación media anual es de 550.5 mm y la temperatura media es: 15.7 °C, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Estaciones climatológicas de la cuenca Huichapan-Tecozautla

ID	Estación	X	Y	Z	Precipitación media (mm)	Años con datos	Temperatura media (°C)	Años con datos
13012	Huichapan	432282.337	2252713.547	2120	394.9	58	15.6	58
13076	Jonacapa	444452.317	2259894.163	2,310	508.1	35	15.5	34
13083	presa madero	424663.706	2247426.812	2,172	519	34	15.4	56
13152	El Potrero	422710.569	2264467.018	1,880	425	25	16	25
13156	Tlaxcalilla	415037.204	2253589.521	2200	511.3	23	14.8	23
13053	Tecozautla	433974.985	2270629.753	1,700	479.8	14	19.4	14
13155	Maravillas	438768.547	2234244.292	2,425	699.6	20	14	18
22025	Presa Centenario	406161.140	2268515.961	1,889	460.3	54	17.8	54
13064	Chapantongo	457160.823	2243288.268	2,120	585.3	46	14.7	46
22031	Presa paso de tablas	412521.679	2271863.980	1,903	499.1	34	17.9	33
15069	Polotitlán	411642.053	2235960.001	2,280	716.4	47	14.3	47
15217	San Juan Acazuchitlan	437030.366	2227087.821	2,605	798.7	33	15	33
22054	El Salitre	427894.212	2291221.712	1,981	324.8	41	18.4	25
13148	Xitha	465244.455	2281788.598	2,081	371.1	26	16.2	26
15185	Presa el Molino	422594.651	2225701.211	2,493	701.7	334	13.4	34
22005	El doctor	438851.549	2305719.988	2,728	812.5	54	13.1	33
Promedio					550.5		15.7	

La distribución espacial de la precipitación y la temperatura se pueden observar en las Figuras 1.2 y 1.3.

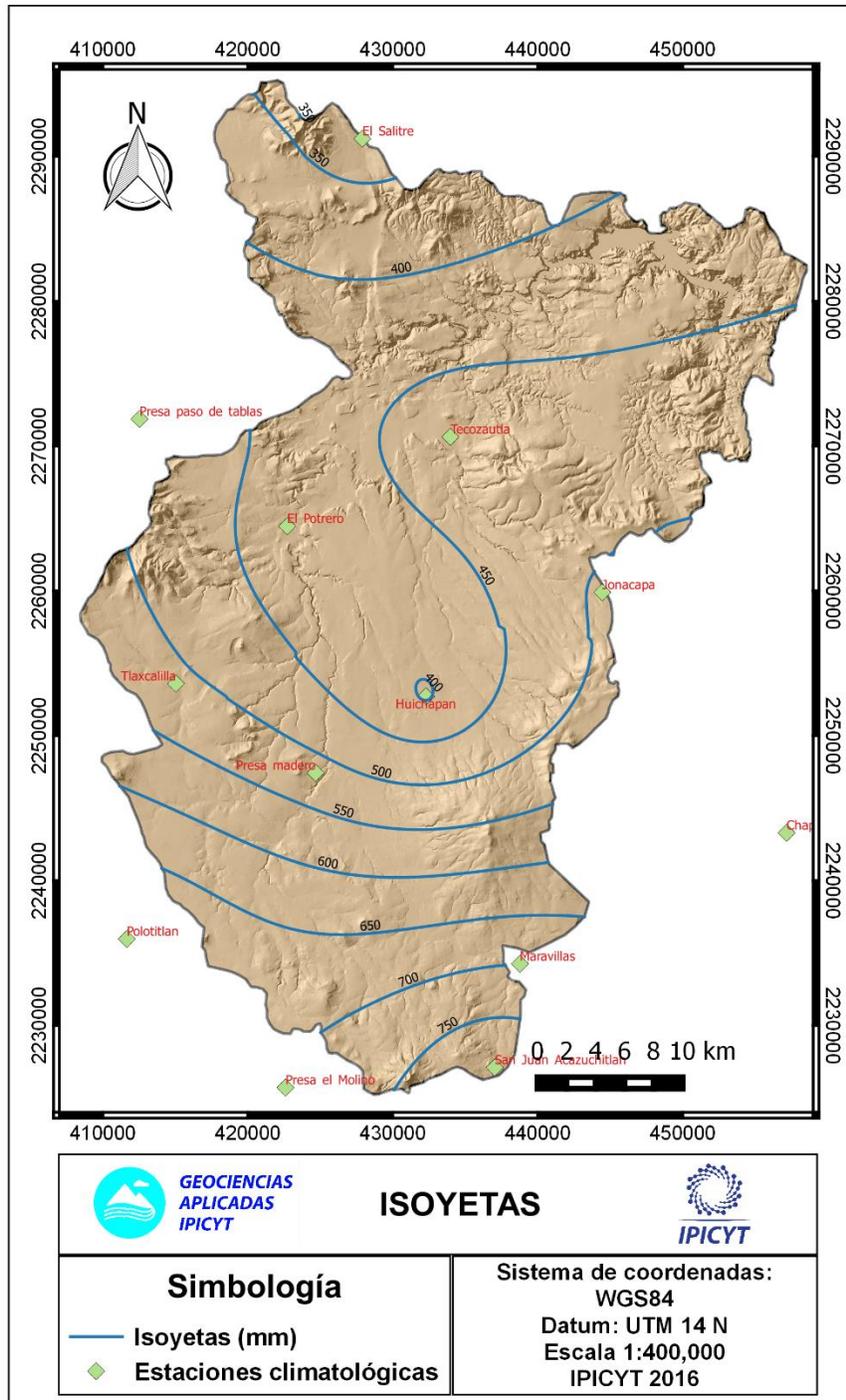


Figura 1.2 Isoyetas medias anuales (mm) y ubicación de estaciones climatológicas.

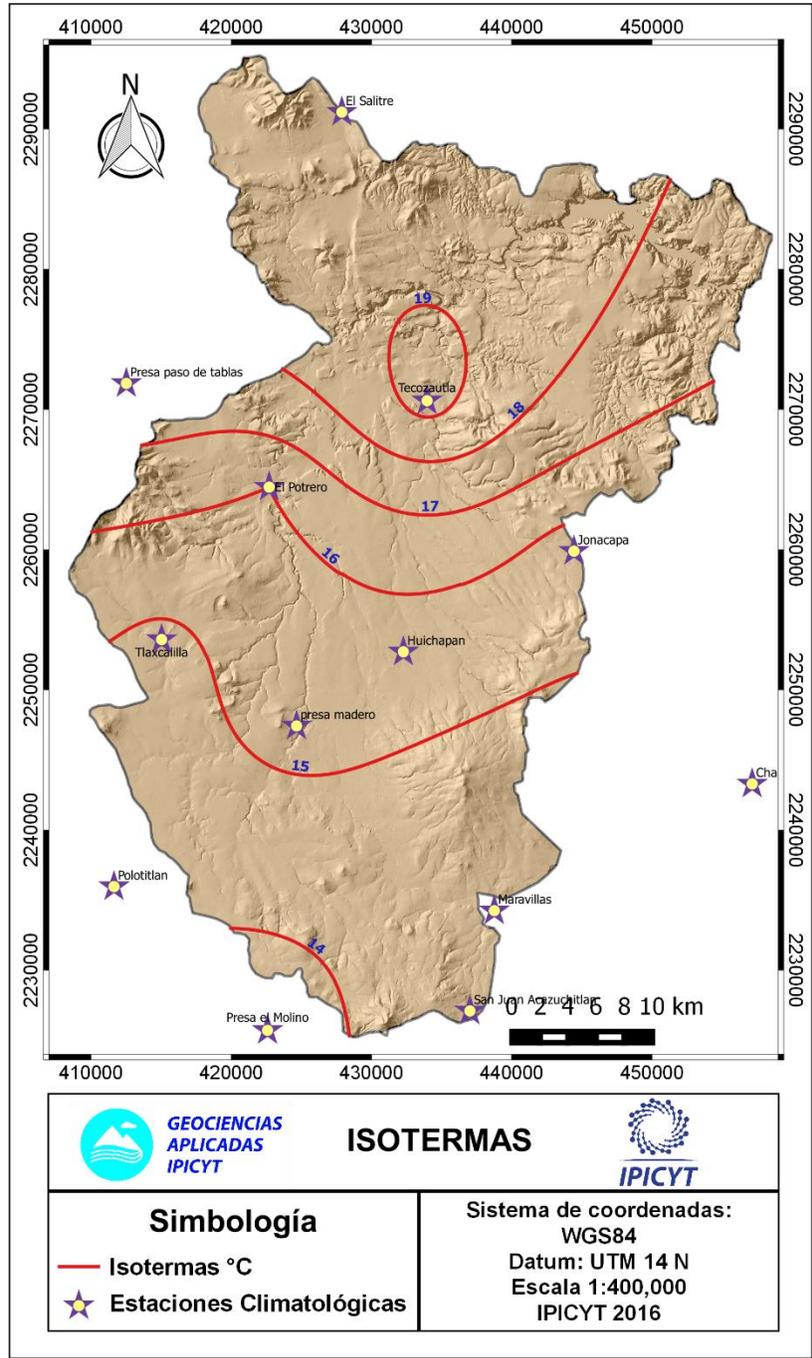


Figura 1.3 Isothermas medias anuales (°C) en el área de estudio.

1.6.3 Flora y Fauna

Existe una gran variedad de vegetación por los diferentes microclimas y las altitudes presentes en la región. La flora se compone principalmente por especies de zonas

semidesérticas formada por nopaleras, matorrales, mezquite, palo dulce, garambullo, biznaga, pitahaya, huizache, maguey y órgano. Además con un área de bosque en donde predomina el encino prieto y oyamel; es notorio que en la mayoría del territorio observamos la gran cantidad de árboles de pirul (INEGI, 2010).

Por su parte, en la fauna predomina el gato montés, liebre, conejo, topo, ratón de campo, ardilla, zorrillo, tlacuache, zorra, conejos, víbora, liebre, tigrillo, tlacuache, armadillo, venado, camaleón, coyote, insectos y arácnidos.; existe además una variedad de aves como el halcón, águilas, gavilán, zopilote, cuervos y reptiles como víboras de cascabel y lagartijas (INEGI, 2010), así como se observan en la Figura 1.4.



Figura 1.4 Flora y fauna presentes en la región.

1.6.4 Relieve y Tipo de Suelo

Este territorio cuenta con una variedad orográfica ya que se localiza en la provincia del eje Neovolcánico formada por lomeríos, sierra, mesetas y llanuras, otra parte se ubica en la provincia de la sierra madre oriental, entre los cerros más destacados de estos últimos encontramos: San Miguel, Colorado, de Sanabria, Cerrito Blanco, Cutejhé y Siempreviva (INEGI, 2010).

Su suelo es de las eras secundaria, terciaria, cuaternaria y mesozoica de color pardo rojizo; es semidesértico y rico en materia orgánica y en nutrientes, el uso principal de la tierra es agrícola y de agostadero, le sigue la forestal como los pastos

naturales, bosque o selva. Por lo anterior podemos decir que es un suelo de buena calidad predominando el tipo feozem, vertisol, planasol, renbzina y litosol en una mínima parte; la tenencia de la tierra es de pequeña propiedad, ejidal y comunal (INEGI, 2010). La mayoría del suelo es de buena calidad se tiene una producción de maíz, avena forraje, frijol, trigo grano y cebada grano (Fig. 1.5).

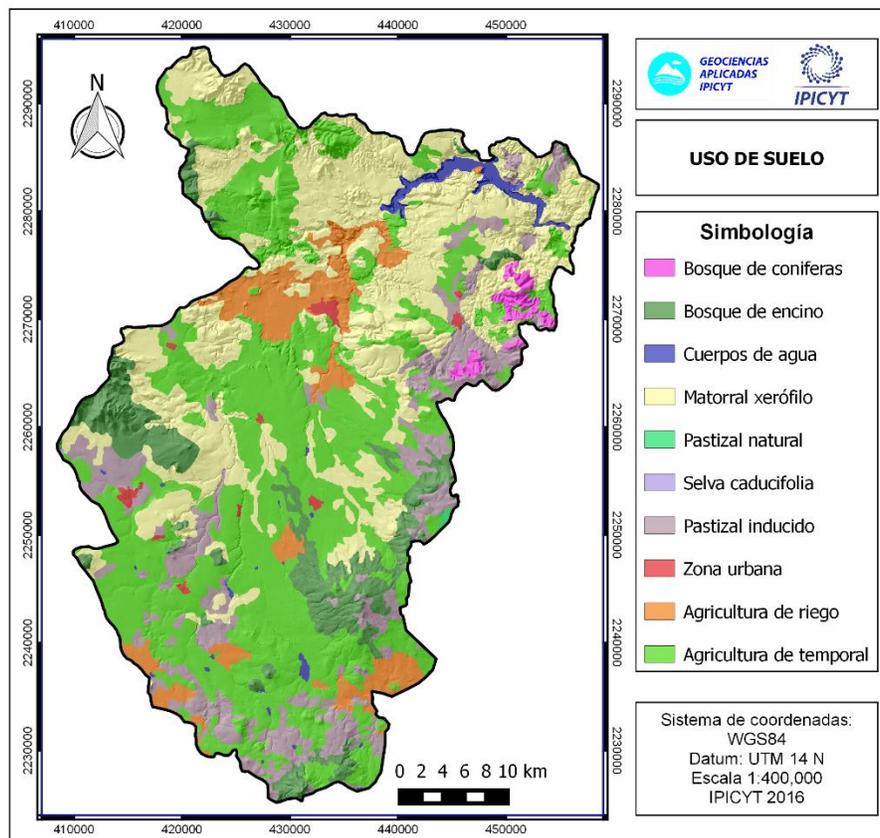


Figura 1.5 Uso del suelo en la cuenca Huichapan-Tecozautla.

1.6.5 Hidrografía

La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 26 “Río Pánuco”, en la subregión del Alto Pánuco (Río Moctezuma). La cuenca hidrológica a la que pertenece la unidad hidrogeológica es la Cuenca Río San Juan, en la subcuenca que conforman los Ríos Tula, San Juan Tecozautla y San Francisco (INEGI, 2010).

Esa conformación se logra a través de las fuentes hidrológicas de este municipio siendo los siguientes; el arroyo Hondo que da tributo al río San Francisco el cual cruza el territorio de este municipio por la parte media de sur a norte, y la presa Francisco I. Madero cuyo vaso filtrante da origen a una unidad de riego muy cercana al río San Francisco y al río Pathecitos, los cuales se juntan en el arroyo Nimacu, dando origen al río Tecozautla (INEGI, 2010), como lo ilustra la Figura 1.6.

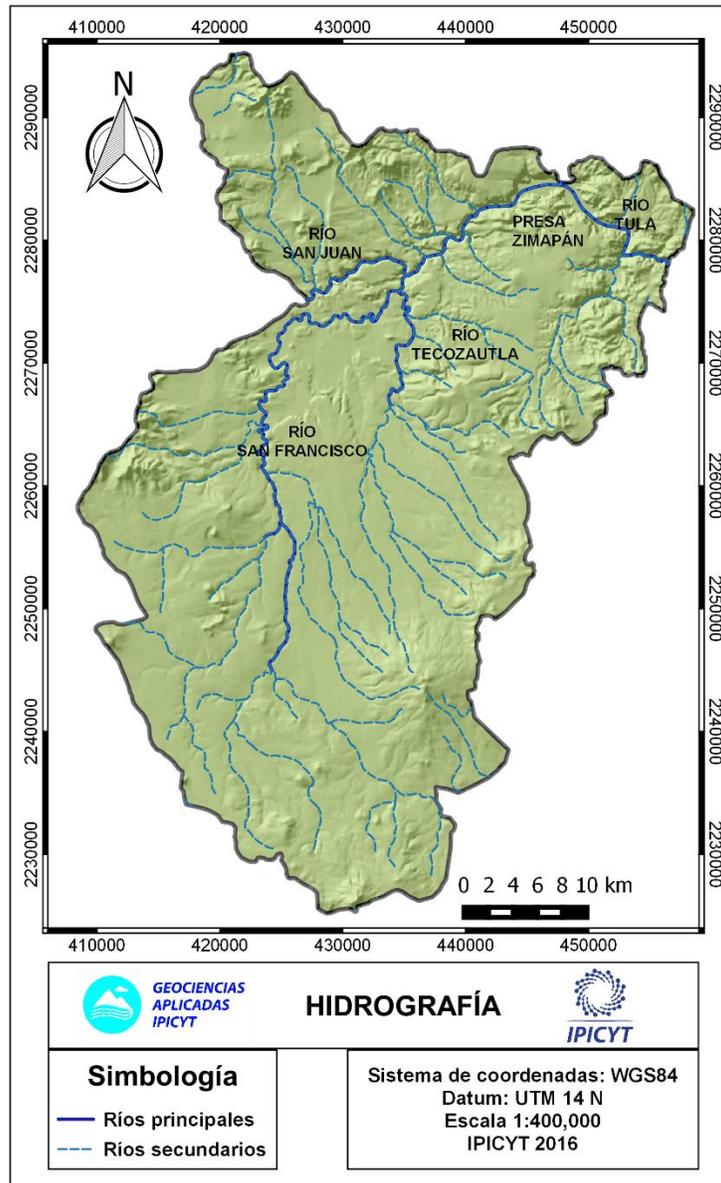


Figura 1.6 Hidrografía de la cuenca Huichapan-Tecozautla.

2. MARCO HIDROGEOLÓGICO

2.1 Geología

El marco geológico donde se sitúa el acuífero Huichapan-Tecozautla, ha sufrido varios procesos geológicos de grandes magnitudes. Las rocas cretácicas son el resultado de los procesos de sedimentación marina en plataformas y cuencas representadas por la Formación El Doctor y las Formaciones Tamaulipas Superior y Soyatal, respectivamente, que ahora conforman grandes estructuras plegadas debido a la Orogenia Laramide (Lesser, 2007).

Por otra parte, el volcanismo asociado con la Faja Volcánica Transmexicana, se inicia en el Mioceno Superior y prevalece hasta el Reciente, lo que generó importantes edificios volcánicos ubicados al centro y sur del área que comprende el acuífero, que tienden a seguir patrones de fallas regionales con orientación este-noreste-oeste-suroeste, que representan una zona de debilidad cortical, es decir una zona donde la corteza es más delgada, por lo tanto, es más propensa al fallamiento o fracturamiento. Los productos de esta actividad volcánica, presentan espesores considerables y se encuentran cubriendo parcialmente a la secuencia sedimentaria (Gómez, *et. al.*, 2005).

En las bajas de los valles, afloran depósitos aluviales conformados por depósitos de pie de monte, suelos residuales y abanicos aluviales constituidos por fragmentos del tamaño de cantos rodados a gravas, del Cuaternario (Lesser, 2007).

La estratigrafía de la región de Huichapan-Tecozautla, comprende del Cretácico Inferior al Reciente y se caracteriza por presentar tres secuencias litológicas principales, representadas por rocas carbonatadas del Cretácico, asociadas a procesos sedimentarios, andesitas y basaltos del Mioceno; así como, rocas piroclásticas y derrames volcánicos (Lesser, 2007).

2.1.1 Sistema Cretácico

2.1.1 a Formación El Doctor

Definición y distribución

Heim (1926), designó como Formación El Abra a una secuencia de caliza arrecifal que aflora en el cañón del Abra, ubicado en el Km 52.143 del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí. De igual forma Wilson *et al.* 1955, la denominaron Caliza El Doctor, debido al poblado en el mismo nombre. En el presente trabajo, solo lo denominaremos Formación el Doctor, debido a que tomando en cuenta que lo único que las diferencia es la localización geográfica y por la zona de estudio es más reconocida así.

La Formación El Doctor, consiste de caliza de estratificación gruesa a masivas, con abundantes fragmentos de rudistas, caprínidos, monopleuridos, toucasia, ostrea y nódulos de pedernal negro, que corresponden a facies de talud. Wilson (1955), describe la Formación El Doctor en cuatro facies: Facie Cerro Ladrón (caliza de estratificación delgada-mediana de color gris oscuro a gris claro) que corresponde a ambiente de plataforma restringida, esta unidad se sitúa a en el Albiano-Cenomaniano (Wilson, *et al.* 1975; Carrasco, 1977), Facie Socavón con caliza clástica de color gris claro y conglomerado de estratificación gruesa, de ambiente pre-arrecifal, Facie San Joaquín (Tamaulipas Superior con calizas de color gris oscuro en estratos gruesos con horizontes de pedernal negro y lutita) de ambiente de cuenca profunda y la Facie La Negra rodea a las demás facies, esta facie consiste de láminas formadas de material clástico de grano fino y tienen intercalaciones de lutita roja. En facies de plataforma, esta unidad alcanza espesores de 1,500- 2,000 m, en tanto que en facies de cuenca tiene espesores de 300-1,200 m (Carrillo y Suter, 1982).

2.1.1b Formación Soyatal

Definición y distribución

Wilson *et al.* 1955, designan con este nombre, a una secuencia consistente de un conglomerado de clastos calcáreos, calizas y calizas arcillosas de color pardo claro y gris oscuro, intercaladas con lutitas calcáreas; la unidad es más arcillosa hacia la cima; con una edad correspondiente al Turoniano. Como localidad tipo, se reconoce al poblado Soyatal, Hgo., a 48 Km al noreste de Zimapan, Hgo.

Algunos autores (entre ellos Carrillo y Suter, 1982), denominan como Formación Soyatal, a toda la secuencia que sobreyace a las unidades calcáreas del Albiano-Cenomaniano; incluyen dentro de la Soyatal, a las rocas arcillo-arenosas que también se denominaron como Formación Mexcala.

Los afloramientos se extienden en el sector septentrional entre el puerto El Colero y Zimapán; en las inmediaciones de los poblados La Vega, Rancho Nuevo, Xajhá, Bothiñá y San Antonio; también está expuesta en afloramientos aislados en el río Tula y en el arroyo las Tuzas. Simons y Maples (1957), midieron a la entrada de la Barranca de Tolimán una sección sin plegar de aproximadamente 700 m. Sin embargo, su espesor puede ser menor, debido a que se encuentra plegada y erosionada.

2.1.2 Sistema Terciario

2.1.2 a Rocas Volcánicas

Las rocas volcánicas, están representadas por andesitas basálticas compactas y vesiculares, con intercalaciones de brechas volcánicas del Mioceno, riolitas de composición intermedia a ácida, flujos piroclásticos con fragmentos de rocas ácidas, riolitas, ignimbritas, tobas lacustres y derrames basálticos intercalados con flujos de cenizas y brechas volcánicas del Oligoceno hasta el Reciente. Estas unidades volcánicas presentan intenso fracturamiento que le confiere buena permeabilidad.

2.2 Hidrogeología

De acuerdo a la descripción de la geología presente en la zona de estudio, se tienen dos tipos de acuífero el superior y el profundo.

El acuífero superior está constituido por materiales volcánicos en espesores que varían de 4 a 500 metros, consisten de ignimbritas fracturadas, coladas de lavas principalmente de composición basáltica, de buena permeabilidad, intercaladas con tobas impermeables; así como, materiales piroclásticos y aluviones permeables intercalados con derrames de lavas basálticas y riolíticas. La alternancia de derrames lávicos permeables con tobas impermeables da origen a diversos manantiales en la región (Fig.2.1).

En las zonas topográficamente elevadas, los afloramientos de las rocas volcánicas funcionan como zonas de recarga o dan origen a acuíferos colgados (Lesser, 2007). Además, en este acuífero se localizan todos los pozos y manantiales existentes. Este acuífero funciona de tipo libre a semiconfinado, heterogéneo y anisotropico, conformado predominantemente por un medio fracturado, en el que el agua subterránea se desplaza a través de las fracturas de las rocas volcánicas (Lesser, 2007).

El acuífero profundo, se encuentra constituido por calizas de la Formación El Doctor y esta confinada por una capa de lutitas de la Formación Soyatal. Este acuífero no está considerado dentro de la bibliografía investigada ya que todos los pozos de la zona de estudio están ubicados en el acuífero superior y no se tiene datos de pozos en calizas de estas formaciones. El acuífero profundo es de tipo confinado.

De acuerdo a la información del censo de captaciones de agua subterránea llevado a cabo en 2011, por la Comisión Nacional del Agua, se registraron 185 aprovechamientos, de los cuales 161 corresponden a pozos, y 24 a manantiales; y del total de pozos, 151 son activos y 34 son inactivos; de los aprovechamientos

activos 21 son manantiales y 130 pozos. Actualmente, algunos de los pozos inactivos se habilitaron para conformar la red de monitoreo.

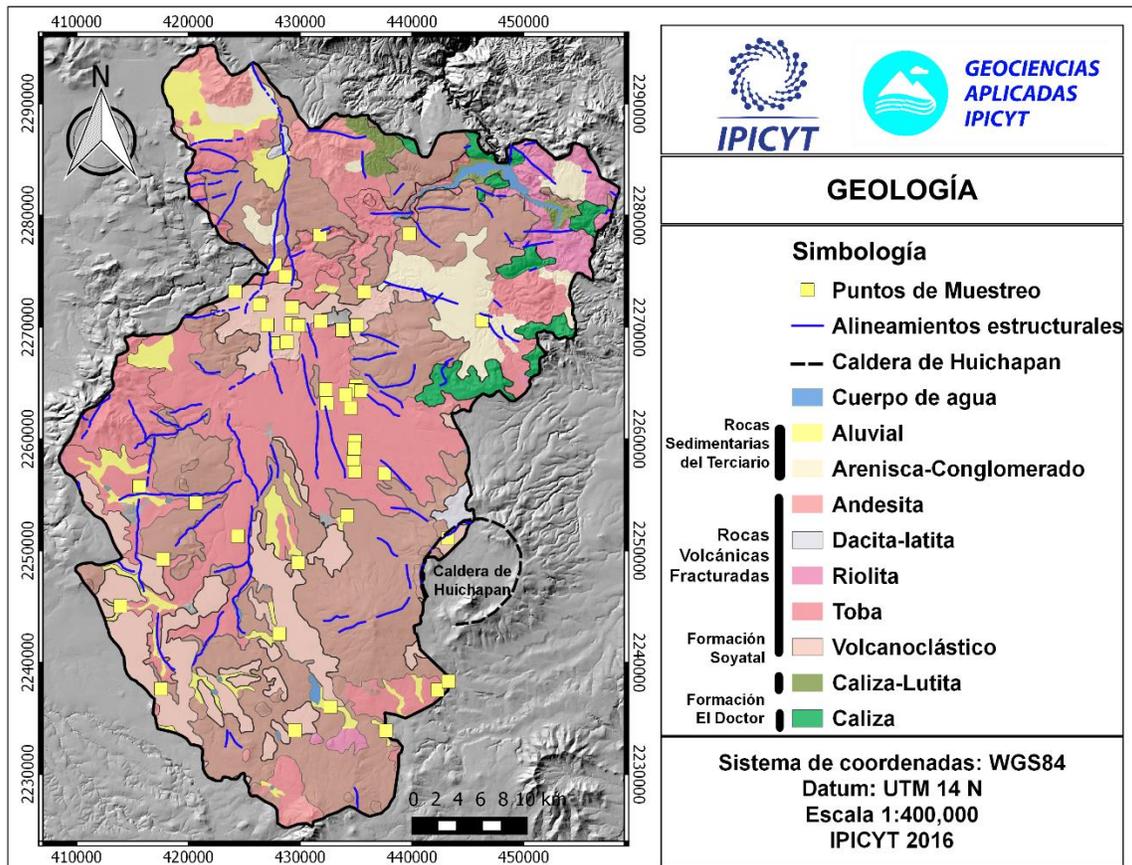


Figura 2.1. Geología de la zona de estudio y principales alineamientos estructurales.

En general, los aprovechamientos se localizan en el acuífero superior, constituido por rocas volcánicas, no existen pozos que hayan cortado a la Formación El Doctor (Figs. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8).

A nivel regional, el flujo principal adopta una dirección de sur a norte, desde el municipio de Nopala de Villagrán y parte alta de Huichapan hacia Tecozautla que correspondería a la zona de descarga, como se representa en la Figura 2.2. Se observa la presencia de un cono de abatimiento, localizado dentro del municipio de Tecozautla, que es donde se ubican los niveles piezométricos más bajos del área de estudio y es ahí donde convergen las líneas de flujo

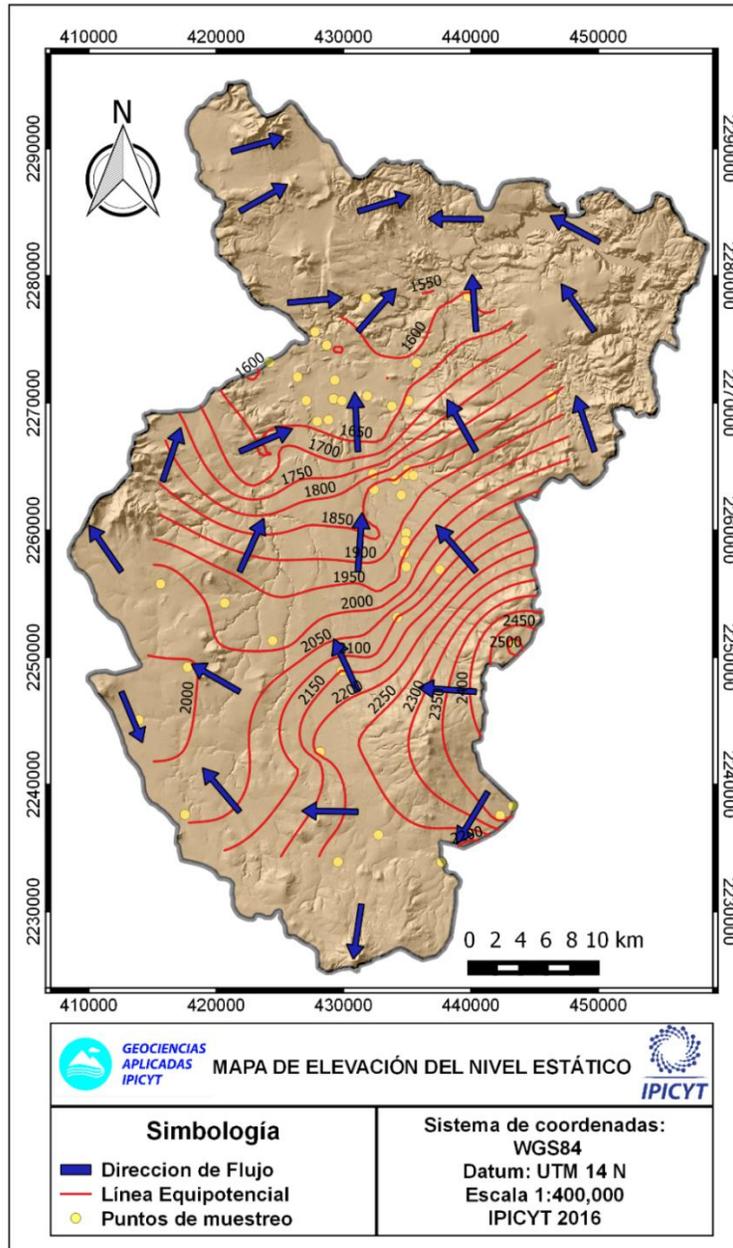


Figura 2.2. Mapa de elevación de nivel estático y direcciones de flujo en cuenca Huichapan-Tecozautla.

Esto se debe a que los aprovechamientos se encuentran distribuidos en todo el acuífero; sin embargo, se observa una gran concentración de ellos en el Municipio de Tecozautla y sus alrededores hacia el noroeste del acuífero, donde se observa un mayor abatimiento en esa zona.

La recarga natural al acuífero, proviene de la infiltración del agua de lluvia, la cual se precipita tanto en las partes altas de las sierras, como en los lomeríos y valles de la región, infiltrándose en el subsuelo hasta alcanzar las rocas volcánicas que constituyen el acuífero, a través y por medio de los sistemas de fracturamiento. Otra parte de la recarga es generada por el retorno de riego en las zonas agrícolas.

De acuerdo a lo estudiado, la zona de Tecozautla presenta condiciones en el subsuelo favorables, ya que esta es la que se localizan el mayor número de pozos, como consecuencia se concentra la extracción del agua en esta zona. Por lo tanto, es la zona que está expuesta a tener mayor abatimiento del acuífero por la distribución tan cercana de los pozos, ya que se encuentra en una zona de valle con presencia de fracturamiento, ocasionando la intercepción del flujo hacia el Río San Juan y la aparición de un cono de abatimiento local.

2.3 Modelo Conceptual

La geología e hidrología, nos sirven como base para establecer el modelo conceptual presente en el acuífero, para lo cual conociendo estos elementos podemos trazar secciones geológicas que nos permitan describir en cada sitio las condiciones geológicas, para lo cual se trazaron cinco secciones geológicas de oeste a este y otra de sureste a noreste la cual que permiten observar el comportamiento del acuífero, como se ilustra en la Figura 2.3.

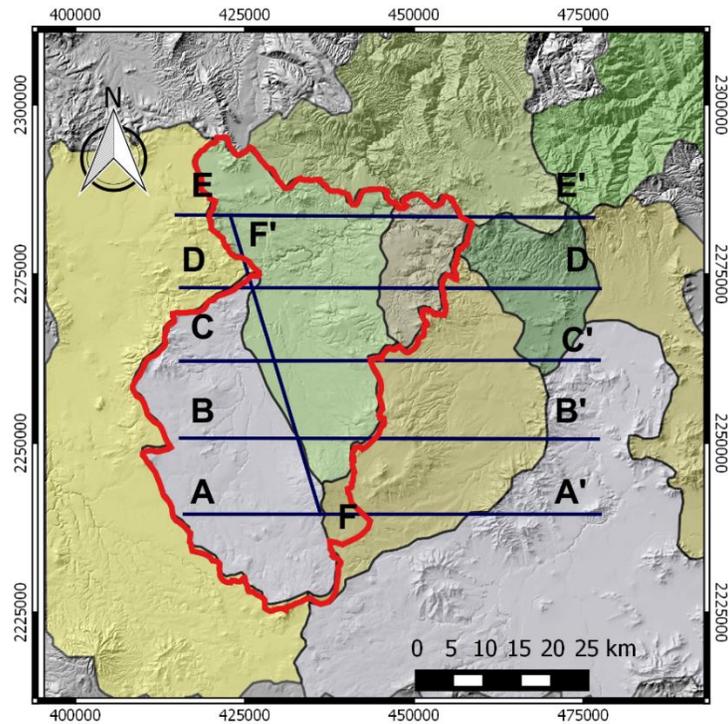


Figura 2.3 Localización de secciones hidrogeológicas en el área de estudio.

2.3.1 Secciones Hidrogeológicas

En la Figura 2.4, se ubica en la parte sur de la zona de estudio, a la altura de Nopala, se muestra la unidad volcánica en la parte superior, la Formación Soyatal, que funciona como acuitardo en la parte media y en la base de la sección la Formación El Doctor. Las flechas azules indican los diferentes flujos subterráneos en el área.

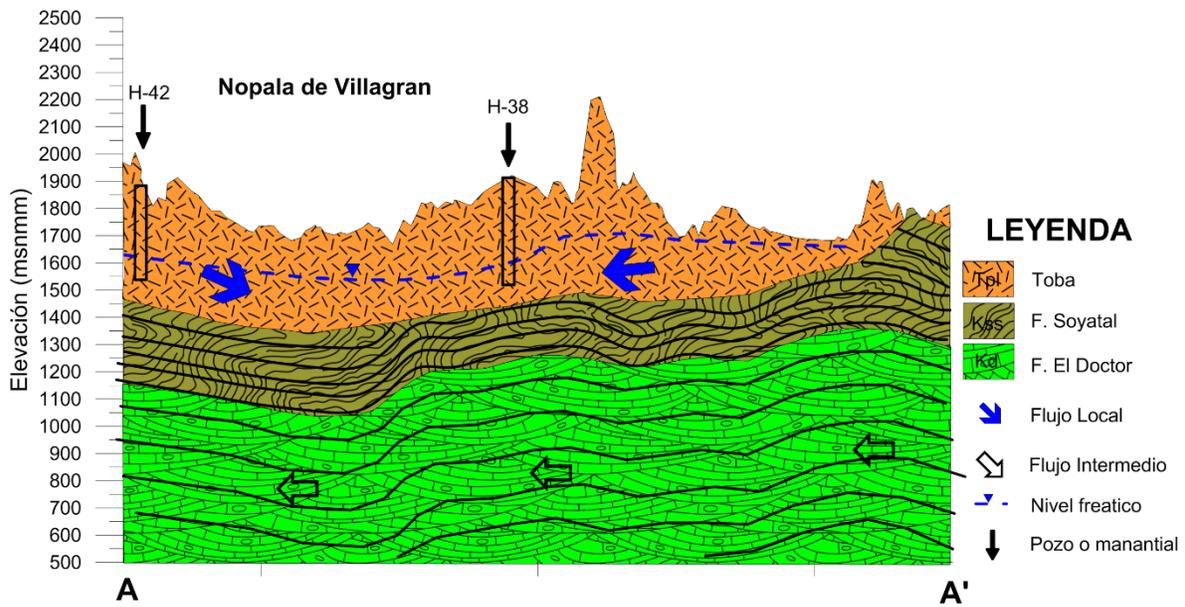


Figura 2.4 Sección hidrogeológica A-A' y principales sistemas de flujo.

La Figura 2.5, se ubica en la parte sur de la zona de estudio, a la altura de Huichapan, muestra un caso similar; sin embargo, el valle se encuentra en un sinclinal de las formaciones cretácicas, con una inclinación mayor en lado derecho de la sección.

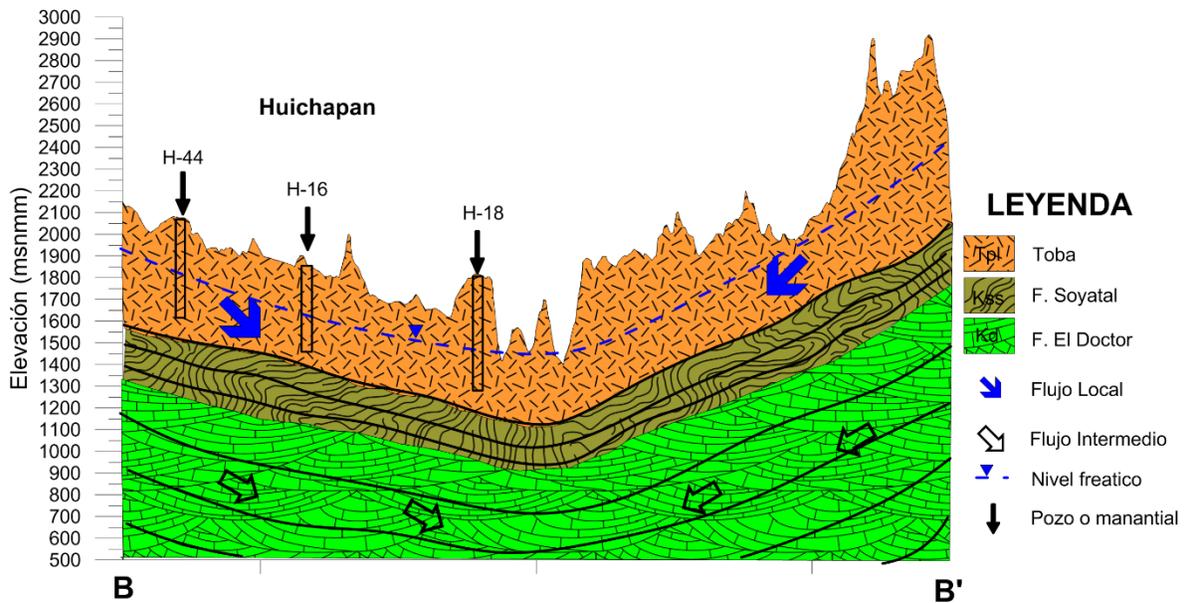


Figura 2.5 Sección hidrogeológica B-B' y principales sistemas de flujo.

En la Figura 2.6, se ubica en la parte media de la zona de estudio, al sur de Huichapan, se observa un anticlinal en el centro de la sección y los espesores de la Formación Soyatal se ven reducidos.

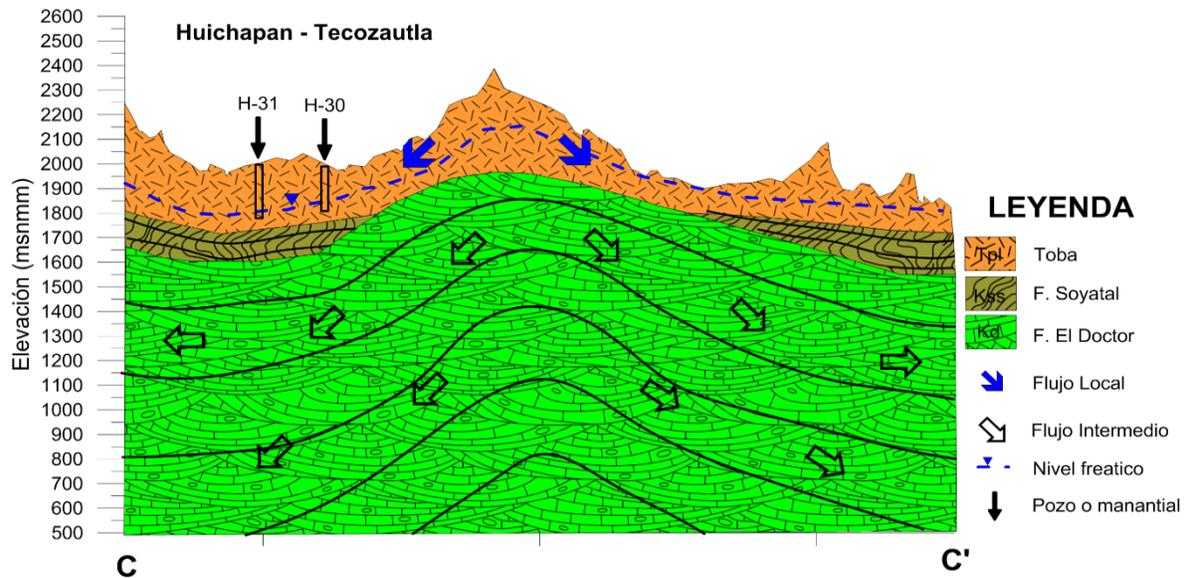


Figura 2.6 Sección hidrogeológica C-C' y principales sistemas de flujo.

En la Figura 2.7, se ubica en la parte norte de la zona de estudio, a la altura de Tecozautla, se mantiene el anticlinal al centro de la sección y la Formación Soyatal se acuña al centro.

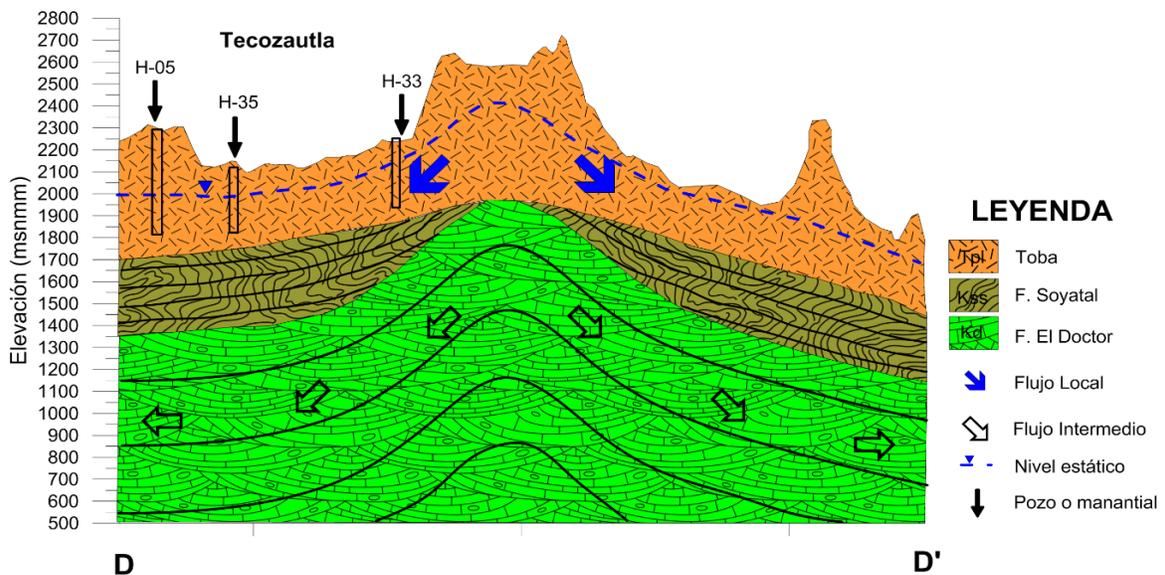


Figura 2.7 Sección hidrogeológica D-D' y principales sistemas de flujo.

La Figura 2.8, se ubica en la parte norte del área de estudio, al sur de Tequisquiapan, en la parte centro se presenta un anticlinal y aflora la Formación Soyatal, al norte de esta sección se ubica la Presa de Zimapán.

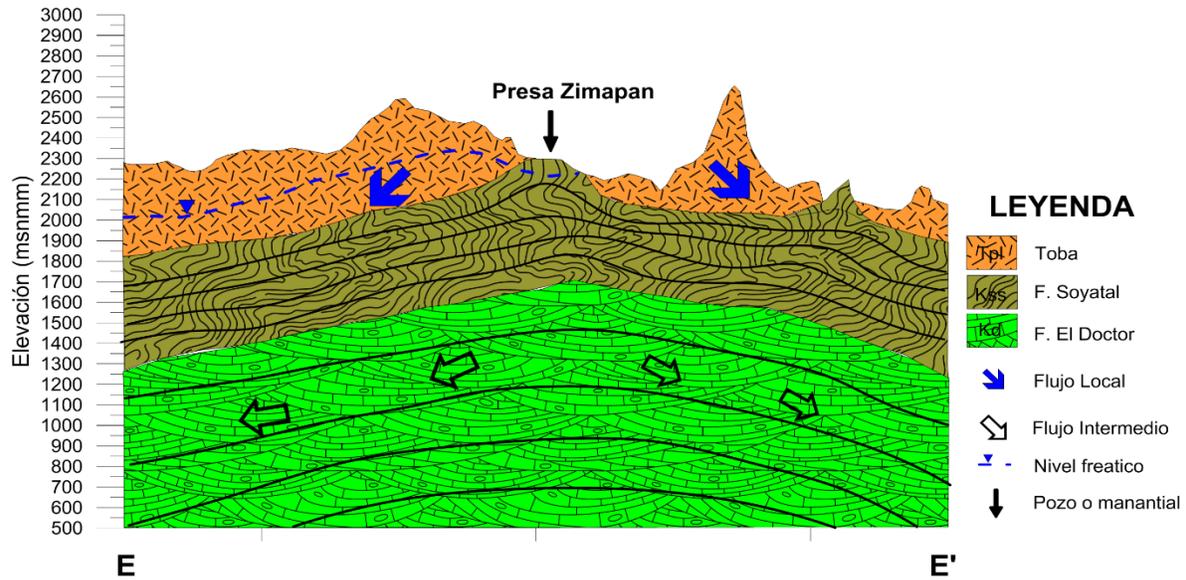


Figura 2.8 Sección hidrogeológica E-E' y principales sistemas de flujo

En general, en las secciones descritas se establece el comportamiento del agua subterránea, el cual está determinado por el marco geológico, la topografía, la precipitación, el uso de suelo y la extracción, por lo que el flujo principal adopta una dirección de sur a norte, pero además se ve alimentado lateralmente por las infiltraciones provenientes de las laderas de las sierras que limitan al valle, tanto por el oriente como por el poniente.

En el área de estudio, se reconocen tres sistemas de flujo que son: local, intermedio y regional. El flujo local está asociado a la recarga local ubicada principalmente en la zona Sur de la zona de estudio, el flujo regional es alimentado por sistemas hidrotermales en tanto que el flujo intermedio tiene mezcla de flujos de recarga local y componente hidrotermal.

3. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO

3.1 Hidrogeoquímica

3.1.1 Técnicas Analíticas

El muestreo de aguas subterráneas se realizó en el mes de octubre de 2015. Durante este periodo se tomaron 45 muestras de pozos y manantiales del sistema acuífero, para determinar cationes y aniones mayoritarios (Fig. 3.1). Las muestras fueron colectadas durante el período de lluvia.

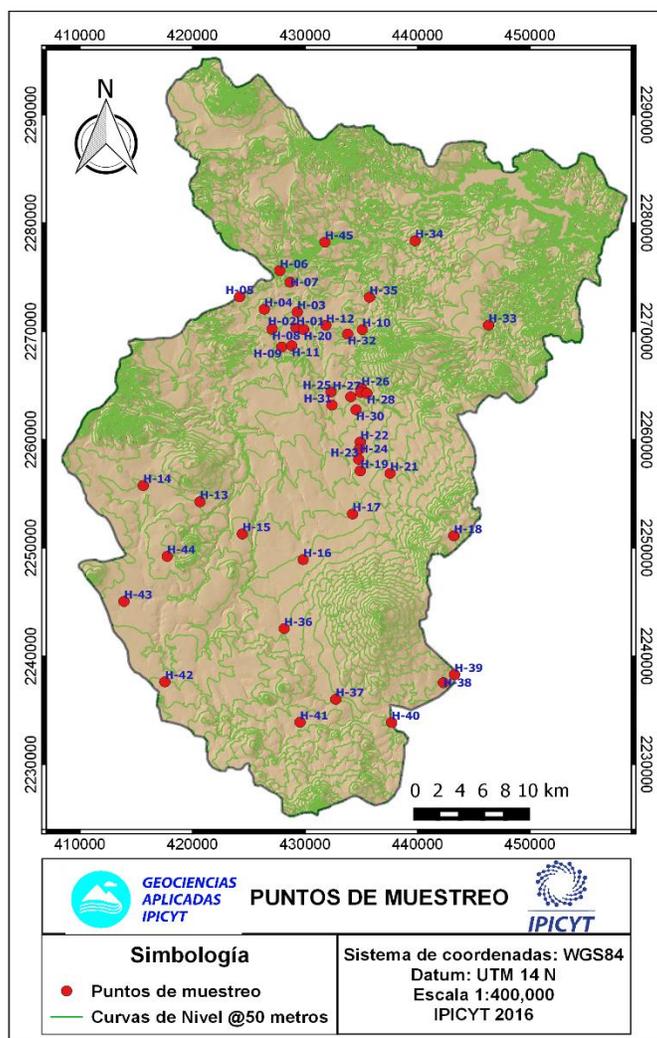


Figura 3.1 Distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio.

Para las muestras de agua colectadas se utilizaron 2 botellas de polietileno de alta densidad con capacidad de 120 ml por cada punto de muestreo (una para aniones y otra para cationes). Previo al muestreo fueron lavadas con jabón Xtran al 2% (libre de fosfatos); y enjuagadas seis veces con agua destilada, posteriormente se dejaron 2 horas en HCl al 10% y por último se enjuagó una vez con agua desionizada. Finalmente se etiquetó cada botella para agilizar la colecta de la muestra, ya que es más fácil identificar las botellas ya con su respectiva etiqueta.

Para cada muestra colectada, se hizo la determinación *in situ* de pH, conductividad eléctrica, temperatura del ambiente, temperatura de la muestra, potencial redox (ORP), oxígeno disuelto (OD), sólidos totales disueltos (STD) y alcalinidad (Fig. 3.2). Inmediatamente después de ser colectadas, las muestras para cationes y elementos traza se acidificaron con 3 gotas de ácido nítrico ultrapuro para obtener un pH < 2 (Esto para evitar reacciones y que los metales se precipiten).



Figura 3.2 Medición de parámetros físicos y colecta de muestras de agua en pozos y manantiales.

De igual manera se utilizó la bomba peristáltica, para realizar el filtrado de las muestras, junto con los porta filtros y filtros de 0.45 μm de la marca millipore.

Todas las muestras obtenidas se almacenaron a una temperatura menor a 4°C hasta el momento de su determinación. Los cationes mayores se analizaron en el

Laboratorio de Radiactividad Natural del Instituto Geofísica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); los elementos traza se analizaron en el Laboratorio de Aguas Subterráneas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

3.1.1 a Análisis de Cationes

Las concentraciones de cationes mayores Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ Y K^+ fueron determinados en un espectrómetro de masa con plasma (ICP), marca Perkin-Elmer modelo plasma 400, utilizando los estándares internacionales SLRS-4 y NIST 1640, como se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Espectro de plasma 400 (ICP).

Técnicamente, una fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP, por sus siglas en inglés) consiste en una corriente de flujo de gas argón ionizado por aplicación de un campo de radiofrecuencias típicamente oscilantes a 40 MHz. Este campo está acoplado inductivamente al gas que se ioniza dentro de una bobina de inducción refrigerada con el mismo gas para este modelo de ICP, lo que lo hace más eficiente en la ionización que rodea a una antorcha de cuarzo que mantiene al gas, el confinamiento del plasma se realiza por el mismo campo magnético generado por la bobina de inducción. Con el nebulizador y cámara de espera se logra que la muestra forme un aerosol, que se lleva al plasma a través de un tubo inyector

colocado dentro de la antorcha. El aerosol de la muestra se inyecta directamente en el ICP, que somete a los átomos que lo componen a temperaturas de aproximadamente 10,000 K debido a ello, tiene lugar una disociación de átomos casi completa, consiguiendo una reducción significativa de interferencia química (Perkin,1990).

El plasma 400 se controla desde un ordenador MS-DOS. En el cual se rellenan los espacios del formulario que aparece en la pantalla y con un amplio uso de la guía permiten que el desarrollo del procedimiento a través de una configuración sea un análisis rápido y fácil. El desarrollo del método simplifica la posibilidad de visualizar, superposición, y la gama de espectros. Un modo EXEC (UTE) permite llevar a cabo métodos más exactos que se desarrollaron originalmente (Perkin, 1990).

La eficaz excitación proporcionada por el ICP, da lugar a bajos límites de detección para muchos elementos. Esto unido al extenso recorrido dinámico, permite una determinación multielemental efectiva de metales. La luz emitida por el ICP, se enfoca sobre la rejilla de entrada de un monocromador o policromador que efectúa la dispersión. Para el análisis óptico de la emisión de fotones provenientes de la muestra, se necesita establecer la longitud de onda (λ) adecuada al elemento por determinar, con esta longitud de onda se asegura solo analizar las ondas dicha longitud, y enviarlas al fotomultiplicador para finalmente ser cuantificadas en el detector.

Esta señal se compara con una señal emitida por una(s) solución(es) estándar con concentración conocida, con lo cual se obtiene la concentración de la muestra en estudio. Cabe mencionar que cada elemento a determinar, debe tener una curva de calibración (soluciones de concentración conocida), para ser confiable los resultados obtenidos (Fig. 3.4).

Los elementos traza fueron medidos en el ICP-OES iCAP 7000 series, modelo iCAP 7400 Duo, marca Thermo Scientific.



Figura 3.4 Calibración de ICP para determinación de cationes mayoritarios.

3.1.1 b Análisis de Aniones

Los aniones mayores (SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-), se analizaron usando un colorímetro SMART 2 Lamotte, este mide de forma fotoeléctrica la cantidad de luz absorbida por una muestra coloreada con respecto a una muestra incolora (blanco). El Colorímetro SMART 2, pasa uno de cuatro haces de luz coloreados a través de uno de cuatro filtros ópticos transmitiendo solo un determinado color o banda de longitud de onda al fotodetector donde es medido. La diferencia en la cantidad de luz de color transmitida por una muestra coloreada es una medida de la cantidad de luz absorbida por la muestra. En la mayoría de los ensayos colorimétricos la cantidad de luz absorbida es directamente proporcional a la concentración del factor de ensayo produciendo color y la distancia de paso a través de la muestra. Sin embargo, en algunos ensayos la cantidad de luz absorbida es inversamente proporcional a la concentración. Se establece un blanco para calibrar y compensar cualquier turbidez o color que resulte de los reactivos, se realiza un ensayo con un muestra de 10 ml de agua destilada y se deduce el resultado del blanco de todos los resultados, Figura 3.5 (LaMotte, 2001; Moran, 2012).



Figura 3.5 Determinación de aniones con el colorímetro SMART 2.

La alcalinidad, CO_3 y HCO_3 , se determinaron en el sitio por el método titulación, aplicando el kit de alcalinidad de la marca Hanna, en el cual se establece un factor como lo indica el manual (Fig. 3.6). El balance iónico, muestra que el 69% de las muestras tienen un error menor al 5 %.



Figura 3.6 Determinación de alcalinidad durante el muestreo.

3.1.2 Diagramas Hidrogeoquímicos

Los datos de hidrogeoquímica del agua subterránea en la región Huichapan-Tecozautla-Nopala, fueron usados para identificar procesos de evolución de la misma, interacción agua-roca, disolución, precipitación, dilución e intercambio iónico que ocurren en el acuífero. Los diagramas e índices hidrogeoquímicos, permitieron entender las relaciones entre los iones presentes en el agua subterránea.

3.2.2 a Diagrama de Piper

Con los datos de iones mayores se construyen los diagramas de Piper. Es un diagrama triangular constituido por dos triángulos equiláteros, donde se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Para usar este diagrama es necesario incorporar las concentraciones de los iones en miliequivalentes por litro (meq/L) y son expresados en porcentaje (%) y sólo se puede reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes (Amaya, 2015). A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones suelen representarse por $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , y $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ y como cationes: $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} y Mg^{2+} . Se proyectan los puntos de los dos triángulos inferiores al rombo superior y se grafica el punto en la intersección.

Estos diagramas permiten reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones-disoluciones, procesos de intercambio iónico; en definitiva, permite ilustrar la evolución hidrogeoquímica de las aguas y permite establecer de forma directa el tipo de agua en relación a las facies hidroquímicas, Figura 3.7 (Songlin Cheng, 1988).

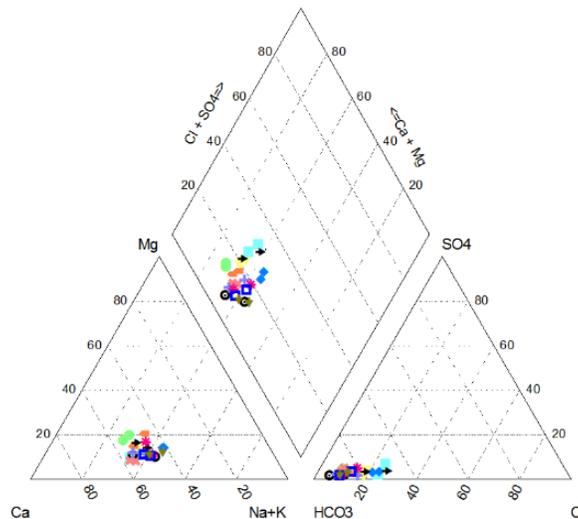


Figura 3.7 Ejemplo de diagrama de Piper (Anderson, *et al.*, 2014).

3.1.2 b Diagramas de STIFF

En este tipo de gráfico, cada análisis se representa por un polígono en meq/L, son apropiados para situarlos sobre un mapa y ver la disposición espacial de las familias hidrogeoquímicas (Fig. 3.8).

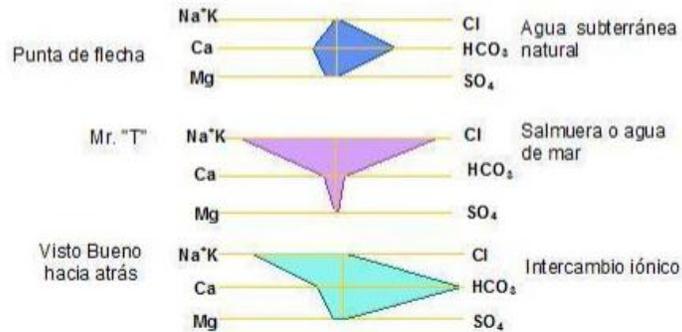


Figura 3.8 Diagramas de STIFF.

3.1.2 c Diagramas de Dispersión

Los diagramas de dispersión, son métodos simples de interpretación de datos Hidrogeoquímicos, los cuales permiten una evaluación preliminar con relación de iones donde se puede establecer balances estequiométricos entre los iones e identificar procesos como el intercambio iónico, dilución, mezclas de agua, grupos de agua, miembros extremos y en general la evolución del agua subterránea (Lloyd et al. 1985; Moran y Ramos, 2014).

2.1.2 d Diagrama de Gibbs

En el diagrama de Gibbs, se grafica la concentración de los sólidos disueltos totales en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas se grafica $Na/(Na+K)$, para cationes y para aniones será $Cl/(Cl + HCO_3)$. Se caracteriza por poseer tres zonas asociadas a los procesos de evaporación, interacción agua-roca y precipitación meteórica. Este diagrama fue desarrollado para el análisis de las aguas superficiales, pero sea aplicado de igual forma en aguas que subterráneas, (Gibbs, 1970), la química de aguas superficiales y subterránea está determinada por tres factores: Lluvia (en el dominio de Precipitación y rápida infiltración); procesos de

intemperismo (interacción Agua-Roca); y el dominio de Evaporación-cristalización (cuestiones de temperatura), como se representan en la Figura 3.9.

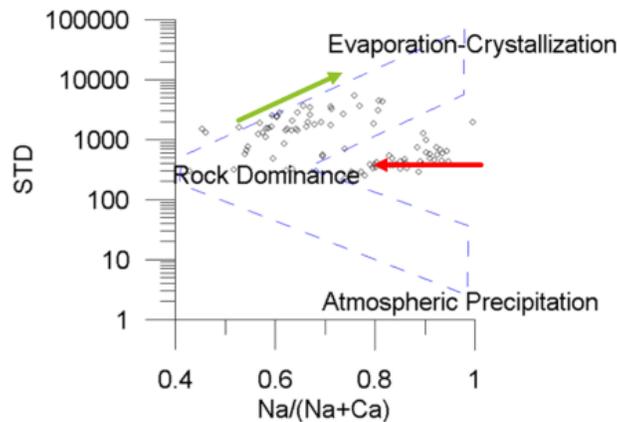


Figura 3.9 Ejemplo de Diagrama de Gibbs.

3.1.2 e Diagrama de Mifflin

El diagrama de Mifflin, ilustra una clasificación de las muestras de aguas subterránea, basada en la creciente concentración de los iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , conforme el agua subterránea evoluciona. La grafica muestra puntos de mayor concentración que corresponde a la descarga en un sistema regional, mientras que, los puntos de menor concentración corresponden a sistemas de flujos locales y en la parte central los de flujo intermedio (Fig. 3.10).

El diagrama, se construye utilizando los iones en miliequivalentes, sumando cationes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y aniones ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) por separado, y estos datos se grafican sobre la ordenada, los cationes y aniones en la abscisa en escala logarítmica. La gráfica está dividida en tres secciones que representan los distintos flujos local, intermedio y regional (Mifflin, 1988).

3.2.1. a Límites Permisibles de Características Químicas.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido (Tabla 3.1). Los límites permisibles se expresan en mg/L excepto cuando se indique otra unidad.

Tabla 3.1 Muestras de que representan características físicas y organolépticas fuera de los límites permisibles.

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Cloruros (Cl)	250
Fierro	0.30
Fluoruros (F ⁻)	1.50
Manganeso	0.15
Nitratos	10
Nitritos	1
pH (Potencial de hidrogeno)	6.5 – 8.5
Sodio	200
Sólidos Totales disueltos (STD)	1000
Sulfatos (como SO ₄ ⁼)	400
Sustancias activas al azul de metilo (SAAM)	0.50

3.2.2 Índice de Calidad del Agua para Consumo Humano (ICA)

El índice de calidad de para el caso en estudio es el ICA y se modifica al modelo propuesto. La estimación del índice de calidad se obtiene con la evaluación numérica del ICA, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico en relación de su concentración (Brown *et al.*, 1970), obteniéndose a partir de una medida geométrica (Ecuación 3.1):

$$ICA = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3.1)$$

Donde:

K es la constante que se asigna de acuerdo a las características físicas del agua (Tabla 3.2)

P_t son los pesos específicos asignados a cada parámetro (t), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

C_t es la calidad del parámetro (t), en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100 que califica la calidad, a partir del cual y en función del uso del agua, permite estimar el nivel de contaminación (Tabla 3.3).

Tabla 3.2 Clasificación de la constante “K” en relación de las características físicas y organolépticas del agua.

PESO	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA
1.00	Para aguas sin aparente contaminación
0.75	Para aguas con ligero color, espuma, turbidez, turbidez aparente no natural
0.50	Para agua con apariencia de estar contaminada y fuerte olor
0.25	Para aguas negras que presenten fermentaciones y olores

Se empleara la clasificación de los criterios generales según el índice de calidad del agua (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Clasificación del índice de calidad del agua modificada de Fernández, 2009 y Martínez, 1979.

NIVELES	ESCALA DEL ICA	USO
0 – 39	Excesivamente contaminada	Inaceptable para consumo
40 – 49	Fuertemente contaminada	Dudoso para su consumo
50 – 69	Contaminada	Tratamiento de potabilización indispensable
70 – 79	Levemente contaminada	Dudoso su consumo sin purificación
80 – 89	Aceptable	Requiere purificación menor
90 – 100	Excelente	No requiere purificación para su consumo

3.2.3 Índice de Contaminación (ICON)

El ICON, es otra forma de evaluar la contaminación del agua subterránea, el cual está representando la suma de factores que se encuentran excedidos según la NOM-127-1994 o a la Environmental Protection Agency (EPA), con este índice es fácil ubicar los sitios que rebasan los límites de elementos y especies iónicas dañinas para la salud humana (Backman *et al.*, 1998).

Se evalúa con la ecuación (Backman *et al.*, 1998), que se describe a continuación:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$
$$C_{fi} = \frac{C_{Ni}}{C_{Ai}} - 1 \quad (3.2)$$

Donde

C_{fi} Factor de contaminación para el i-esimo componente

C_{Ai} Valor analítico del pésimo componente

C_{Ni} Concentración superior permisible del i-esimo componente (N significa valor normativo)

Los índices de ICON, pueden ser positivos o negativos de acuerdo a su concentración química, los valores negativos indican que no se han rebasado los límites permisibles de la NOM.127-SSA1-1994, se encuentran principalmente en zonas de recarga y/o zonas sin contaminación; mientras que los valores positivos se asocian con parámetros que han rebasado los límites de referencia y apuntan a problemas de contaminación (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Clasificación del agua según el índice del ICON

CONTAMINACIÓN	RANGO ICON
Baja	≤ 1
Media	1-3
Alta	≥ 3

3.2.4 Calidad del Agua para Riego

En la clasificación del agua de riego, se asume que el agua podría ser usada en condiciones normales con respecto a la textura del suelo, velocidad de infiltración, drenaje, cantidad del agua usada, clima y tolerancia del cultivo. Las desviaciones de los rangos promedios de alguna condición hacen inseguro el uso de esta agua o necesaria de algunas condicionantes (Wilcox, 1955).

Para obtener la calidad del agua para uso agrícola, se determinó el riesgo de salinidad (conductividad eléctrica) y el riesgo de sodicidad (Relación de adsorción de sodio), son considerados como un indicador de la conveniencia o limitación del empleo del agua en el riego agrícola, aplicando los índices de Relación Adsorción de Sodio (RAS), porcentaje de sodio (%Na), basados en las ecuaciones estándar de acuerdo con la concentración de aniones y cationes presentes en el agua, en conjunto aportan una visión más amplia de la calidad del agua para uso agrícola.

3.2.4 a Condición de sodicidad

El sodio, calcio y magnesio tienden a interactuar en un proceso de intercambio catiónico, mientras que el potasio y amonio, presentan mayor resistencia y se mantiene fijos, teniendo como consecuencia un desequilibrio del suelo por la mayoría de cargas negativas (Porta y López, 2010). La presencia del sodio en altas concentraciones afecta la calidad estructural del suelo, llevando a un decaimiento de la permeabilidad y la velocidad de infiltración (Jairo, 2009).

3.2.4 b Relación de adsorción de sodio (RAS)

Los constituyentes inorgánicos del agua para uso agrícola, reacciona con el suelo. Los principales cationes son el calcio, magnesio y sodio, con concentraciones menores de potasio. Los principales aniones son el carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro, con flúor y nitratos en bajas concentraciones. El peligro de alcalinidad en

al agua para uso agrícola es determinado por las concentraciones absolutas y relativas de cationes. Si la relación del sodio es mayor, el peligro de alcalinidad es alto y en cambio si el calcio y el magnesio son predominantes, el peligro es bajo. La importancia de los constituyentes catiónicos de un agua empleada en el riego en relación a las propiedades físicas y químicas del suelo, fueron reconocidas antes del intercambio catiónico (Richards, 1954).

El RAS, es una relación de adsorción del sodio por el suelo, como consecuencia la relación tiene ventajas para el uso del índice del sodio o peligroso de alcalinidad del agua. Donde el índice es definido por la ecuación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (3.3)$$

Dónde: sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg); y sus concentraciones son representados en miliequivalentes por litro (meq/L) (Richards, 1954).

3.2.4 c Diagrama para la clasificación del agua de riego

El diagrama para la clasificación de la calidad del agua para el uso agrícola es basado en la conductividad eléctrica en micromhos por centímetro y la relación de adsorción de sodio. Los límites en el grafico representan la relación entre los cationes solubles e intercambiables, dando origen a la clasificación. Los límites son empleados utilizando ecuaciones empíricas (Richards, 1954).

$$Linea_{sup}: S = 43.75 - 8.87 * (\log C);$$

$$Linea_{med}: S = 31.31 - 6.66 * (\log C);$$

$$Linea_{baj}: S = 18.87 - 4.44 * (\log C);$$

Donde S= relación de adsorción de sodio; C= Conductividad Eléctrica.

Para el caso de la conductividad eléctrica se emplearon los límites establecidos en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Clasificación del riesgo de salinidad en el agua de riego

RANGO C. E. ($\mu\text{mhos/cm}$ a 25 °C)	CLASIFICACIÓN
< 250	Baja
251 – 750	Media
751 – 2250	Alta
2251 – 4000	Muy Alta
4001 – 6000	Excesiva
> 6000	Excesiva

Para clasificar por CE y RAS, se utiliza la Figura 3.11, en donde ya se encuentran establecidas 16 clases de aguas (Clasificación Riverside, California) (Palacios y Aceves, 1970; Del Valle, 1992, Aguilera y Martinez,2002; Porta, 2010).

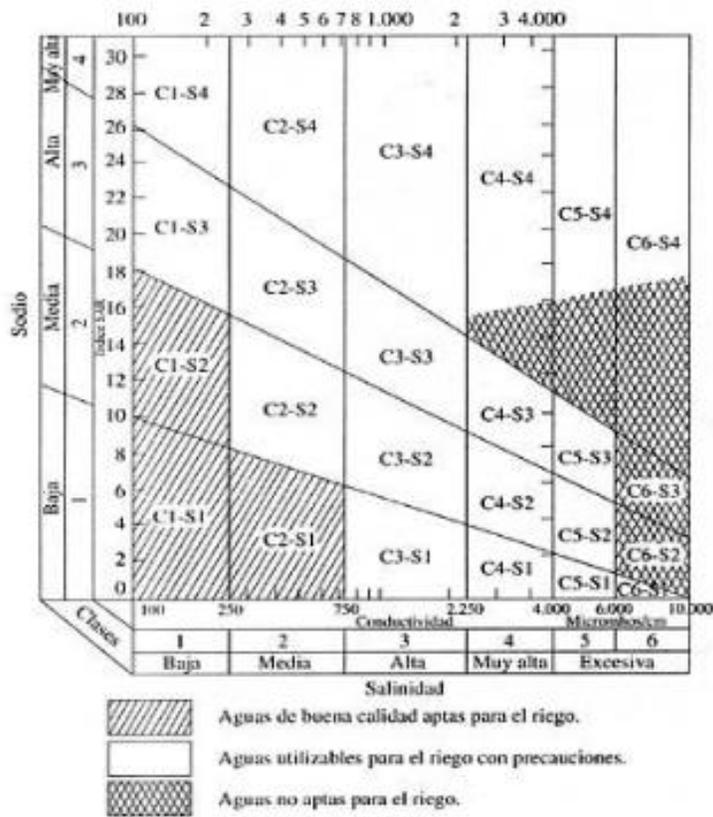


Figura 3.11 Diagrama para la clasificación de salinidad para riego (Richards, 1954).

3.2.4 d Porcentaje de Sodio (%Na)

El efecto nocivo para el suelo, es relacionado a la relación de sodio en el agua de riego con el total de cationes, resultando la concentración de sodio. Esta relación, es llamada porcentaje de sodio y es definida por la ecuación que se muestra a continuación, la concentración está en meq/L (L. Wilcox, 1955; Wilcox, 1948).

$$\%Na = \frac{Na^{+}+K^{+}}{Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^{+}+K^{+}} \quad (3.4)$$

3.2.4 e Diagrama de Wilcox (%Na vs CE)

Las características que evalúa el gráfico de Wilcox, son la concentración total o conductividad eléctrica y el %Na. Para los límites en la CE y el %Na son sugeridos (Sofield, 1936), y son mostrados en la Tabla 3.6. Una vez obtenidos los límites de las dos características a considerar en el gráfico, (Wilcox, 1948), con el cual obtenemos una mejor clasificación que al considerar los parámetros por separado. En el gráfico los límites del %Na son representados por líneas curvas, para la conductividad eléctrica por líneas curvas y para la conductividad eléctrica por líneas verticales como se muestra en el la Figura 3.12.

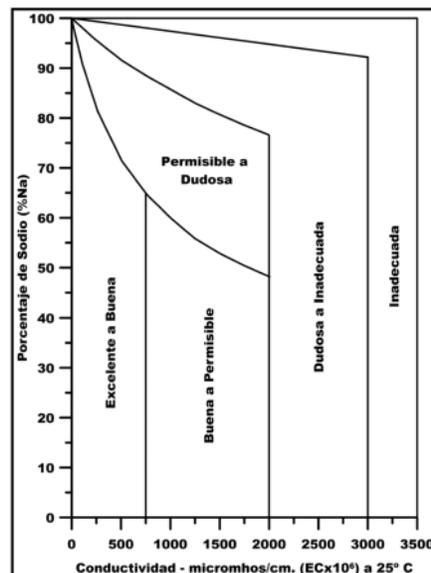


Figura 3.12 Diagrama de Wilcox.

Tabla 3.6 Clasificación para conductividad eléctrica y porcentaje de sodio.

Calidad del Agua	Rango (CE x 106 a 25°C)	%Na
Excelente	<250	<20
Buena	250 a 750	20 a 40
Permisible	750 a 2000	40 a 60
Deficiente	2000 a 3000	60 a 80
Inadecuada	>3000	>80

3.2.4 f Relación de Kelly

La RK evalúa el riesgo de alcalinidad en función del sodio con respecto a la concentración de calcio y el magnesio, se obtiene mediante la siguiente ecuación (Kelly, 1963):

$$RK = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \quad (3.5)$$

La RK se clasifica de acuerdo a la tabla 3.7

Tabla 3.7 Clasificación de la relación Kelly en el agua de riego.

Calidad del agua	Rango (meq/L)
Buena	< 1
Inadecuada	> 1

3.3 Vulnerabilidad Acuífera

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, es un tema actual en la gestión del recurso hídrico y su evaluación tiene como objetivo la protección del agua subterránea: prevención de la contaminación y la conservación (el mantenimiento) de la calidad del agua subterránea (Valcarce *et al.*, 2001). La vulnerabilidad puede ser intrínseca o específica, la primera es independiente de la naturaleza del contaminante y será utilizada en el presente trabajo; por el contrario

la específica se utiliza para definir la vulnerabilidad del agua subterránea asociada con algún contaminante en particular o un grupo de contaminantes (Ramos, 2002).

En muchos de los casos los mapas de vulnerabilidad son creados para obtener una rápida evaluación del riesgo de contaminación, también son usados en procesos de toma de decisiones para cuestiones ambientales, en ellos solo evalúa el riesgo potencial de una región, considerando los factores que pueden influir en la posible contaminación de una fuente contaminante al acuífero. Además, involucran la identificación de áreas susceptibles para la modificación de la calidad del agua subterránea, debido a la interacción de características físico-químicas que aumentan o retrasan el movimiento de contaminantes en la zona no saturada (Ramos, 2002).

Los métodos DRASTIC y SINTACS, son los más utilizados y debido a que utilizan los mismos parámetros, son muy similares. La diferencia entre ambos métodos es la asignación de pesos, las escalas y los intervalos de puntuación. DRASTIC utiliza tablas de puntuación y SINTACS utiliza gráficas de puntuación. Ambos métodos son los más completos y robustos que los otros (Ramos, 2002). La vulnerabilidad acuífera incluye parámetros importantes tales como: tipo de suelos, recarga neta, profundidad del acuífero, topografía, tipo de material del acuífero, material de la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero, los cuales pueden tener influencia en los procesos que alteran la calidad del agua subterránea.

En el presente trabajo se hará uso del método SINTACS, ya que considera la infiltración eficaz, o la precipitación efectiva que llega al acuífero, lo que hace necesario la cuantificación de datos climáticos (precipitación, temperatura y evapotranspiración) y conocer la condición geológica superficial (Civita y De Maio, 2000).

3.3.1 Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos con SINTACS

El método SINTACS, es un derivado del DRASTIC, desarrollado por Civita *et al.* (1997) como adaptación a las características hidrogeológicas de Italia y a una escala de trabajo de mayor detalle; ambos evalúan la vulnerabilidad del acuífero dividiendo el mismo en celdas o polígonos, para los cuales calculan un índice de vulnerabilidad a partir de un sistema por rangos ponderados. En otras palabras, estos métodos definen rangos para cada uno de los factores que emplean y además, asignan un peso en función de la importancia relativa de ellos. La suma de estos rangos ponderados permite obtener un índice que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono del acuífero. A mayor valor de este índice, mayor es la probabilidad de que el acuífero sea contaminado (Aller *et al.* 1985).

El método SINTACS, es un esquema de clasificación numérica desarrollada para evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio en específico, como es el caso de la zona de estudio en el acuífero de Huichapan Tecozautla. Esta metodología comprende siete parámetros: S, I, N, T, A, C, S; descritos a continuación en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Parámetros del método SINTACS

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
S	Profundidad del agua
I	Infiltración eficaz
N	Zona no saturada
T	Tipo de suelo
A	Características hidrogeológicas del acuífero
C	Conductividad hidráulica
S	Pendiente de la superficie topográfica

La determinación del índice SINTACS, se determina aplicando la siguiente expresión:

$$I_{SINTACS} = \sum_{j=1}^7 P_j W_j \quad (3.6)$$

Donde:

I es el índice de vulnerabilidad SINTACS

P (1,7) es el puntaje de cada uno de los factores

W (1, N) son pesos respectivos.

Para la asignación que corresponde a cada parámetro para la variable (P), se le asigna una puntuación de 1, el cual será la mínima vulnerabilidad y de 10 para la máxima vulnerabilidad, esto de acuerdo a los rangos paramétricos que estableció Civita y De Maio 2000, que se describen a continuación:

3.3.1 a (S) Profundidad del agua

La profundidad del nivel estático, puede presentar variaciones tanto temporales como espaciales, los cambios laterales pueden ser abruptos debido a la presencia de conos de abatimiento, estructuras geológicas que cambian la conductividad hidráulica, produciendo condiciones de fronteras entre acuíferos (Ramos, 2002).

Para el caso de esta metodología la asignación de valores se realizara a través de los valores establecidos de acuerdo a los parámetros que manejan Civita y De Maio 1997, como lo muestra la Figura 3.13, donde establece como intervalo de profundidad del medio es de 100 metros.

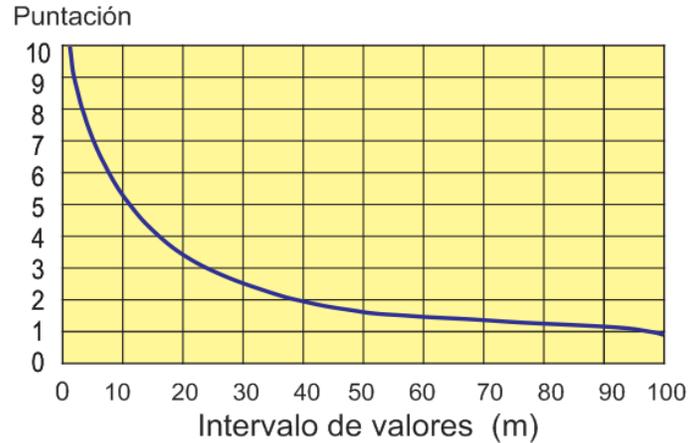


Figura 3.13 Profundidad del agua (Civita y De Maio, 1997, 2000)

3.3.1 b (I) Infiltración eficaz

La infiltración eficaz, es también llamada precipitación eficaz depende de la precipitación y de la evapotranspiración real (Aller *et al* 1985; Civita y De Maio, 1997).

$$IE = P - Er \quad (\text{mm/año}) \quad (3.7)$$

Donde:

IE es la infiltración eficaz (mm/año)

P es la precipitación media anual (mm)

Er es la Evapotranspiración real anual (mm).

La evapotranspiración real se evalúa con la ecuación de LTurc (1954), la cual está en función de la temperatura y la precipitación.

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} \quad (\text{mm/año}) \quad (3.8)$$

Donde el parámetro L, depende de la temperatura (T) y se evalúa mediante la siguiente ecuación:

$$L = 300 + 25 * T_c + 0.05 * T_c^3 \quad (3.9)$$

La temperatura media anual, se calculó con la siguiente expresión (Aller *et al.* 1985; Civita De Maio, 1997):

$$T_c = \frac{\sum P_m * T_m}{\sum P_m} \quad (3.10)$$

Donde:

P_m es la precipitación media mensual (mm),

T_m es la temperatura media mensual (°C).

El rango de los valores obtenido, es ponderado de acuerdo a la Figura 3.14. La cual contiene los intervalos o el valor ponderado para la infiltración eficaz.

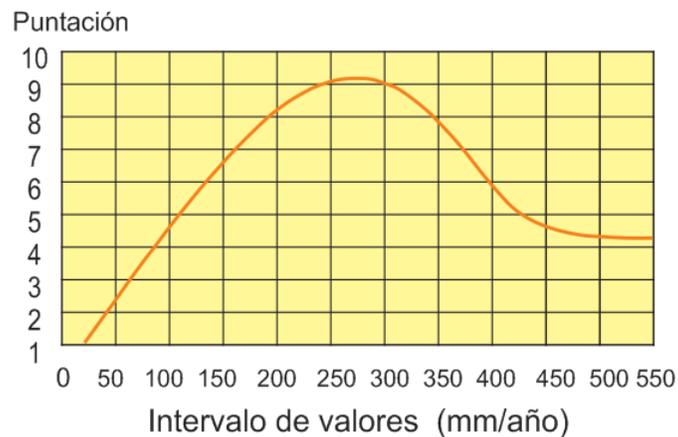


Figura 3.14 Infiltración eficaz (Civita y De Maio, 2000)

3.3.1 c (N) Zona No Saturada

Este parámetro, tiene un comportamiento temporal y espacial similar al tratado en el medio acuífero, de igual forma, escenarios como sierras y valles presentan complicaciones en la selección de intervalos de material y esto puede producir una toma inapropiada de índices de vulnerabilidad. En escenarios estratificados se aplica la misma expresión utilizada en el parámetro de tipo acuífero.

La aproximación para la evaluación del impacto de la zona no saturada en SINTACS se presenta en la Figura 3.15, (Aller *et al* 1985).

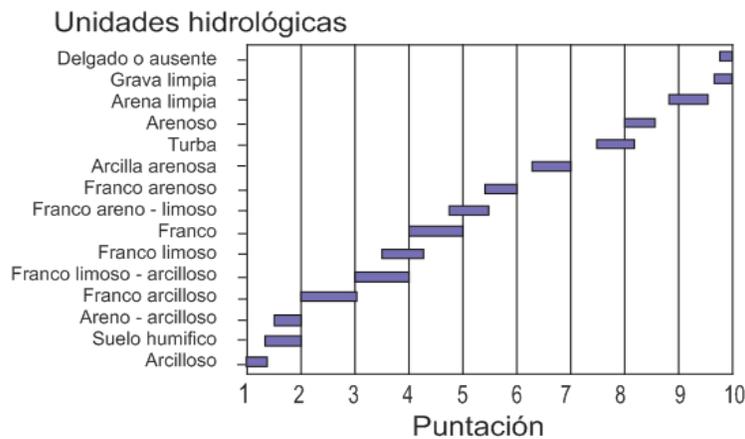


Figura 3.15 Zona no saturada (Civita y De Maio, 2000)

3.3.1 d (T) Tipo de Suelo

Se considera como suelo, el material no consolidado, localizado a poca profundidad del terreno (1-2 metros), contiene la materia orgánica y alimenta la cobertura vegetal (Boulding, 1995). El estado físico del suelo juega un papel muy importante en el transporte de una sustancia, en su interacción con el suelo, una sustancia puede sufrir procesos de retardación, dilución y en casos especiales su eliminación (Wilson, 1991; Foster e Hirata, 1991). La información para la asignación del tipo de suelo se incluye en la Figura 3.16, con su puntuación de importancia.

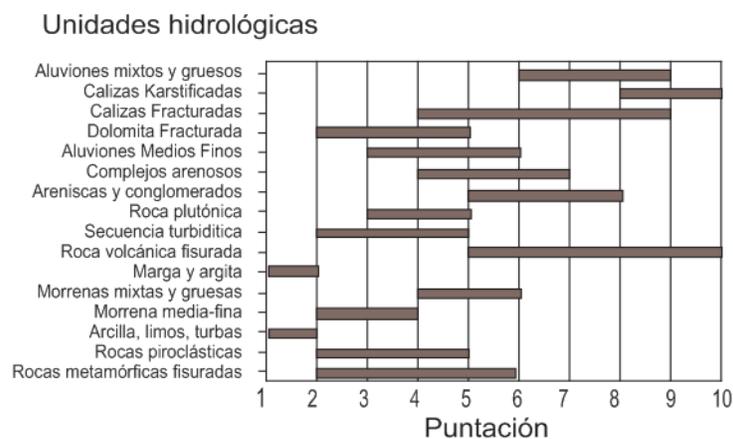


Figura 3.16 Tipo de suelo (Civita y De Maio, 2000)

3.3.1 e (A) Características Hidrogeológicas del Acuífero

El método original fue pensado para un medio homogéneo; sin embargo, en muchos escenarios es común encontrar interdigitación o estratificación de diferentes materiales.

En la Figura 3.17, muestra los valores a asignar de acuerdo al tipo de material geológico presente en la zona de estudio.

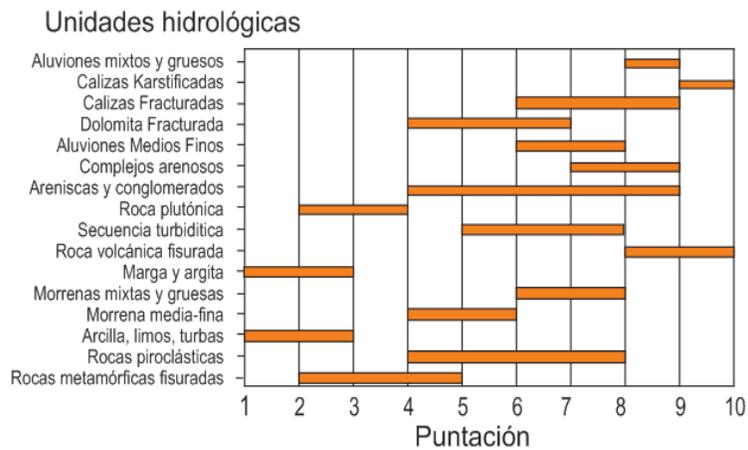


Figura 3.17 Características hidrogeológicas del acuífero (Civita y De Maio, 2000)

3.3.1 f (C) Conductividad Hidráulica del Acuífero

La sensibilidad de este parámetro es de tipo espacial. Se presenta principalmente en escenarios en donde se producen interdigitaciones de materiales con diferentes propiedades hidráulicas. Este parámetro es notablemente sensible ante la presencia de estructuras geológicas como fallas, diques y cuerpos plutónicos, que cambian abruptamente la permeabilidad del medio (Ramos, 2002).

La Figura 3.18 Establece los rangos de pertinentes a la conductividad hidráulica del parámetro acuífero.

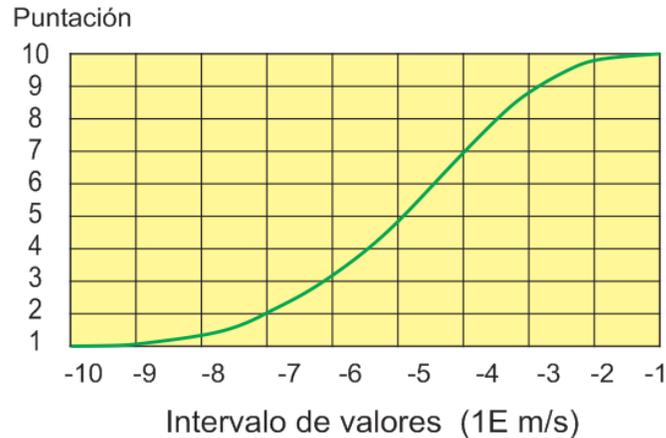


Figura 3.18 Conductividad Hidráulica (Civita y De Maio, 2000)

3.3.1 g (S) Pendiente de la Superficie Topográfica

La pendiente del terreno influye sobre el escurrimiento superficial del agua y sustancias potencialmente contaminantes, debido a que a menor pendiente topográfica mayor posibilidad existe que el agua superficial o alguna sustancia contaminante se infiltre al subsuelo (Aller *et al.* 1985; Wilson, 1991; Ramos, 2002). En la Figura 3.19, se ilustra la asignación de valores al parámetro pendiente.

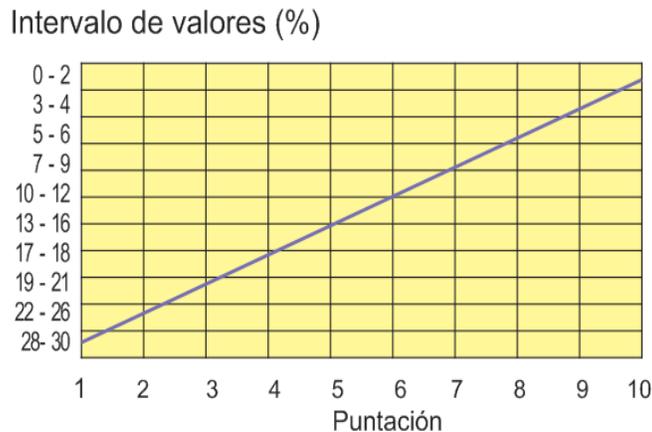


Figura 3.19 Pendiente de la superficie topográfica (Civita y De Maio, 2000)

Para la asignación del peso (W), respectivo de cada parámetro, el método SINTACS considera en particular cinco condiciones específicas, asociadas con el nivel de desarrollo socio ambiental de una región y algunos aspectos hídricos; los mismos

son: impacto normal (IN), impacto relevante (IR), drenaje (D), cárstico (C) y Fisurado (F).

El puntaje del peso es distinto para cada condición, pero en un rango de 1 a 5 (Tabla 3.9). De la cual su mayor en la sumatoria para cada parámetro es 26.

Tabla 3.9 Valores de peso asignado a cada parámetro en función de cada condición específica (Civita y De Maio, 2000)

Parámetro	Impacto Normal (IN)	Impacto Relevante (IR)	Drenaje (D)	Cárstico (C)	Fisurado (F)
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	5	5	4
Σ	26	26	26	26	26

Para el caso del presente trabajo, el área de estudio es una zona agrícola principalmente por lo que para el cálculo de la vulnerabilidad consideraremos el de impacto Relevante (IR), ya que este parámetro es el que nos describe más la vulnerabilidad de contaminación del acuífero por el uso de agroquímicos y fertilizantes utilizados en la agricultura.

3.3.2 Normalización de la Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad está en función del puntaje de los siete parámetros utilizados en la metodología SINTACS y estos siendo multiplicados por un peso como ya se describió anteriormente. Puesto que los valores del índice van de 23 a 260 puntos, Es necesario uniformizar las escalas de vulnerabilidad, ya que no son las mismas en los diferentes métodos, se ha propuesto una normalización en

términos de la puntuación porcentualizada, de tal manera que se manejen grados de vulnerabilidad en una escala de 1 a 100 (Fig. 3.20).

$$Ivn = 100 \left(\frac{Iv - Iv_{min}}{Iv_{max} - Iv_{min}} \right) \quad (3.11)$$

Donde:

Ivn: Índice de vulnerabilidad Normalizado

Iv: Índice antes del proceso de normalización

Iv_{max}: Índice máximo observado dado por el método

Iv_{min}: Índice mínimo observado dado por el método

Para lo cual se hace para que los valores pasen a una escala de 1 a 100, utilizando el método propuesto por Civita y De Maio (1997).

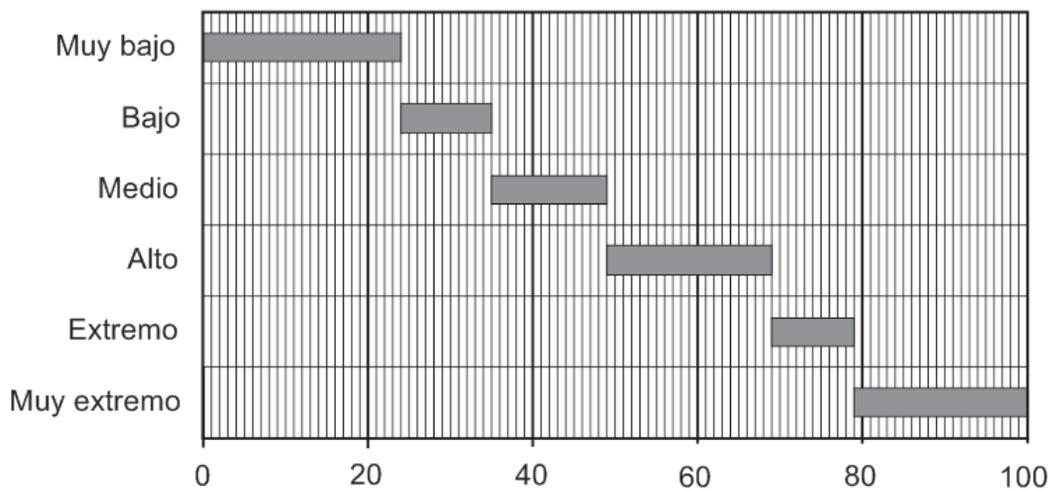


Figura 3.20 Grados de vulnerabilidad porcentualizados para el índice SINTACS (Sappa y Vitale, 2001).

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación, por lo que para explicarlo, lo dividiremos en tres secciones, la primera es con la finalidad de describir los diagramas hidrogeoquímicos del agua obtenidas a partir de las determinaciones químicas, como segunda apartado, se describirá la el índice de calidad del agua y por último la vulnerabilidad acuífera.

4.1 Diagramas Hidrogeoquímicos

Para la caracterización y clasificación de las aguas presentes en la región Huichapan-Tecozautla, se utiliza el contenido de aniones y cationes, estos son representados en los diferentes diagramas hidrogeoquímicos descritos con anterioridad en la metodología con lo cual se obtuvieron los siguientes datos:

4.1.1 Diagramas de Stiff

En la Figura 4.1, se observa dos grupos de agua, en el área norte de la zona de estudio encontramos el área de descarga y la principal familia de agua son bicarbonatadas sódicas, se encuentran sobre el acuífero conformado por rocas volcánicas (basaltos y tobas), las cuales le otorgan estas características químicas a las aguas subterráneas al estar en contacto.

El área de recarga, se encuentra al sur de la zona de estudio y podemos ver la evolución de dicha agua como se enriquece en iones como Mg y en alguno sitios con calcio hacia la zona norte y la familia de agua presentes son las bicarbonatadas cálcicas. Este diagrama, nos ayuda a visualizar el comportamiento del agua subterránea.

De igual forma se en la Figura 4.2, se representa la clasificación de las muestras de agua y su distribución espacial.

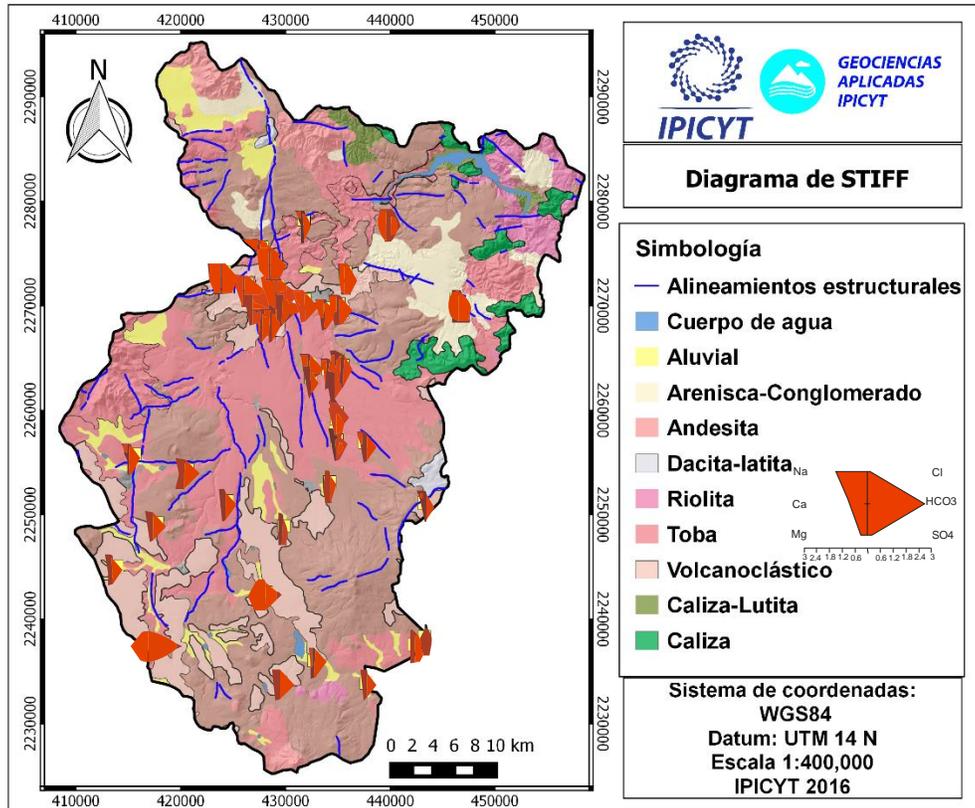


Figura 4.1 Mapa de distribución de los diagramas de STIFF.

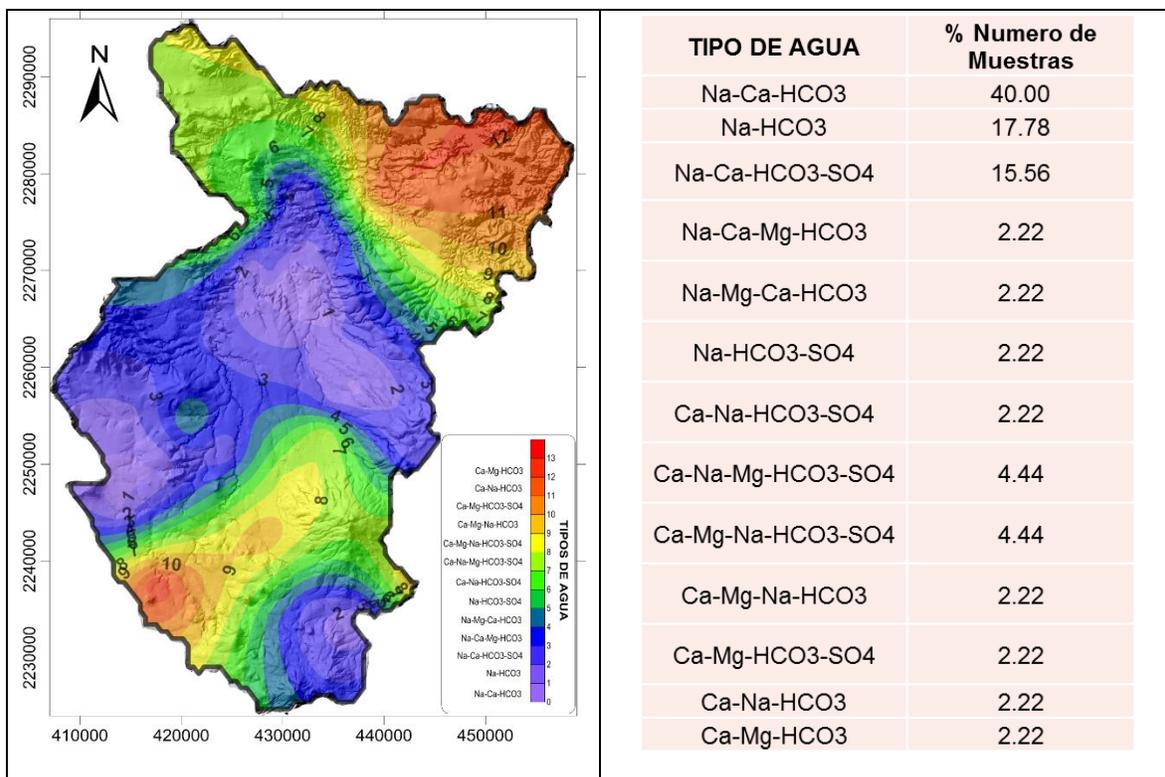


Figura 4.2 Tipos de agua y su distribución en la zona de recarga y descarga.

4.1.3 Diagrama de Gibbs

En el diagrama de Gibbs (aniones y cationes), se indica cuando tenemos un agua de reciente infiltración; como se observa en la Figura 4.4, la zona superior a la derecha del boomerang, se observan los procesos evaporativos, la interacción agua roca, la ubicamos en la zona central de nuestro diagrama, en esta zona es donde encontramos nuestras muestras del acuífero de Huichapan-Tecozautla, donde el principal proceso que está presente es la interacción agua roca, y en algunas muestras se observa una tendencia evaporativa.

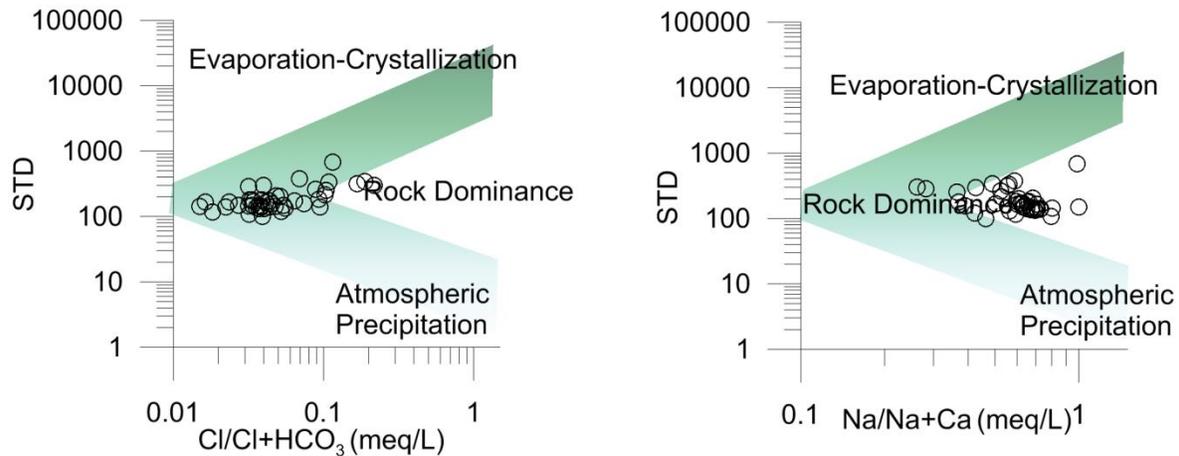


Figura 4.4 Diagramas de Gibbs, en donde el principal proceso es el de interacción agua - roca.

4.1.4 Diagramas Ternarios

El proceso de intercambio iónico de calcio por sodio, se representa en los diagramas ternarios (Fig. 4.5), donde se observa como el ion Ca, es desplazado por el ion Na y las aguas subterráneas del acuífero de Huichapan-Tecozautla tienden a volverse bicarbonatadas sódicas, además existe una tendencia a evolucionar hacia aguas sulfatadas esto se puede justificar porque en la zona se encuentra agua de origen termal con alto contenido de azufre.

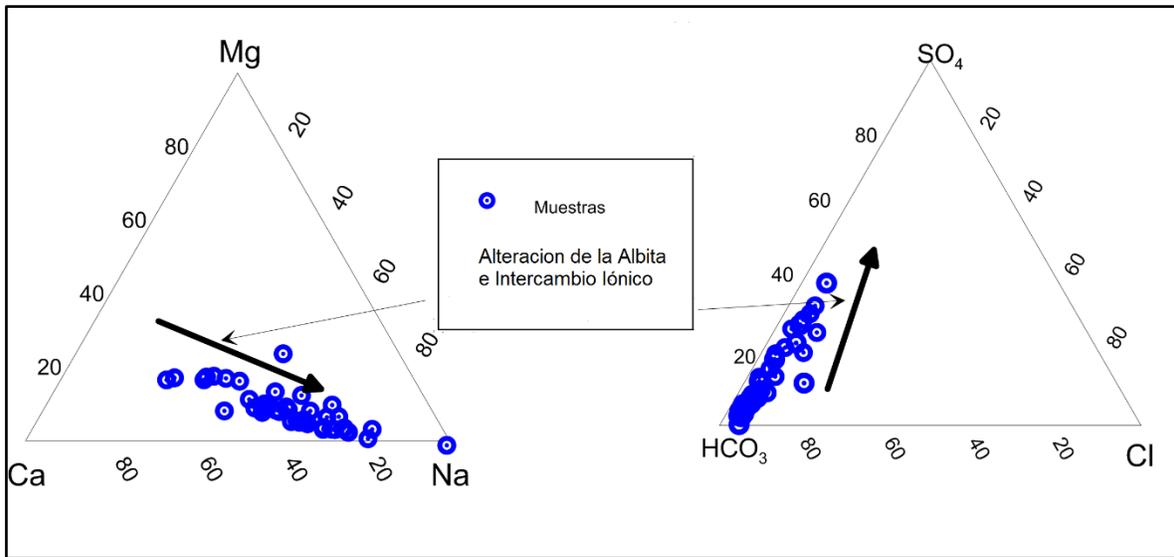


Figura 4.5 Diagramas ternarios en el que se representa el proceso de intercambio ionico y el la olución de albita

4.1.5 Diagrama de Mifflin

Para la identificación del posible origen del agua subterránea o procesos de mezclas, se utilizan las relaciones iónicas que se pueden presentar en el subsuelo. Mifflin (1988), utiliza la relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ para la identificación de los flujos regionales; así como, la caracterización de algunos procesos evolutivos (Fig. 4.6). De igual forma, se identificaron tres tipos de flujo, uno local, otro intermedio y uno más, regional. Como se puede observar, las muestras pertenecientes a flujos más locales están cercanas a la zona de recarga. Las aguas más evolucionadas o de flujo regional se localizan al norte del área de estudio en el acuífero, es en Tecozautla en donde se localizan aguas de flujo intermedio muy cercanas al regional.

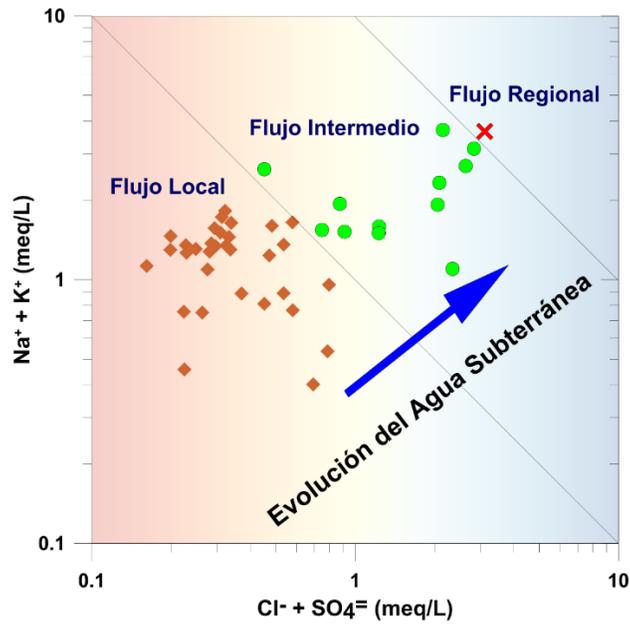


Figura 4.6 En el diagrama de Mifflin se tienen tres tipos de flujo, el local, intermedio y regional

En la Figura 4.7 se observa la distribución espacial de las muestras de agua y su proceso evolutivo el cual va de norte a sur.

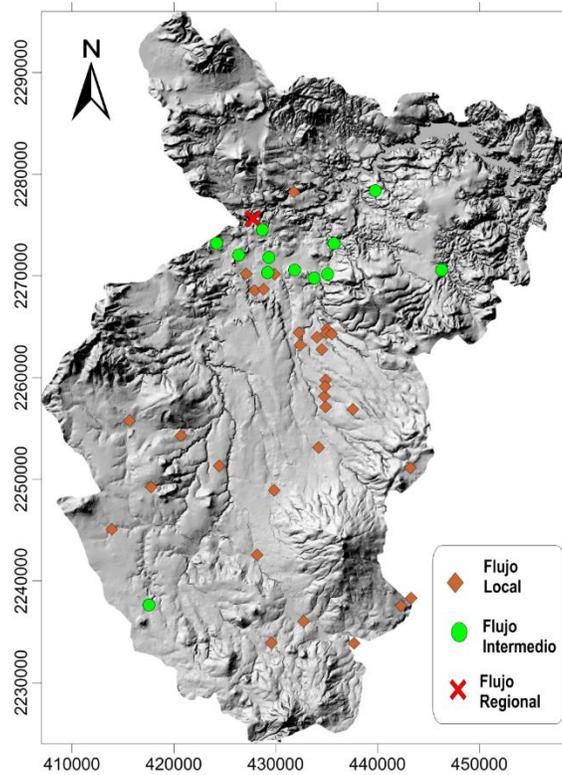


Figura 4.7. Distribución espacial de los tipos de flujos del agua subterránea.

4.1.6 Diagramas de Dispersión

En el diagrama representado en la Figura 4.8 a, se realizó la gráfica de aniones y cationes en el que se observa el comportamiento de las aguas, para lo cual se traza una línea del origen de las ordenadas con una pendiente negativa, lo cual permite identificar el proceso de intercambio iónico de nuestro sistema, mostrando que los puntos más cercanos a las línea presentan un proceso de intercambio iónico. Además, comprobando que no es el único proceso evolutivo y que se tiene mezcla de aguas subterráneas.

En la Figura 4.8 b, si la relación fuera 1:1, esto significaría que las reacciones dominantes en el sistema es la disolución de carbonatos. Sin embargo, la mayoría de las muestras caen debajo de la equilínea, por lo tanto, el proceso predominante es la meteorización de silicatos.

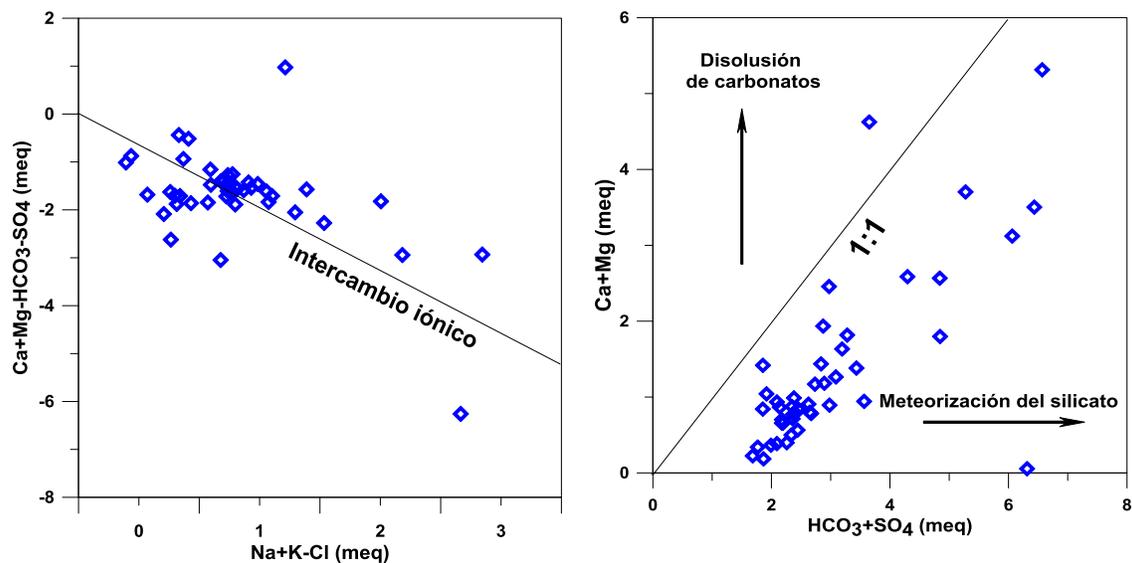


Figura 4.8 Diagramas de dispersión a) Na+K-Cl vs Ca+Mg-HCO₃-SO₄ y b) HCO₃+SO₄ vs Ca+Mg.

En la Figura 4.9 a, podemos encontrar el proceso evolutivo del agua reflejado en 3 grupos, en el primer grupo las que tienen menor contenido de Cl y una menor CE corresponden a la zona de recarga, en el segundo grupo las de mayor concentración

en ambos parámetros corresponden a la zona de descarga, y entre ambas se encuentra un tercer grupo, con características de alto contenido de Cl, pero concentraciones intermedias de CE.

De lo cual, en el área de descarga tenemos aguas más evolucionadas, mientras que en las del área de recarga, son aguas menos evolucionadas y en el intermedio se encuentran aguas que tienen un proceso de mezcla. Por último tenemos una muestra que se separa del resto por tener mayor contenido de Cl, esta corresponde a un agua subterránea de origen hidrotermal, la cual está asociada al flujo regional.

En la Figura 4.9 b, se tienen tres grupos, el primero con la menor concentración de los iones corresponde a la zona de recarga y el grupo de mayor concentración corresponden al área de descarga. El tercer grupo, es variado y encontramos en este el agua de origen hidrotermal posible mezcla con el acuífero.

Asimismo, se observa el proceso evolutivo que como lo ilustra la Figura 4.7.

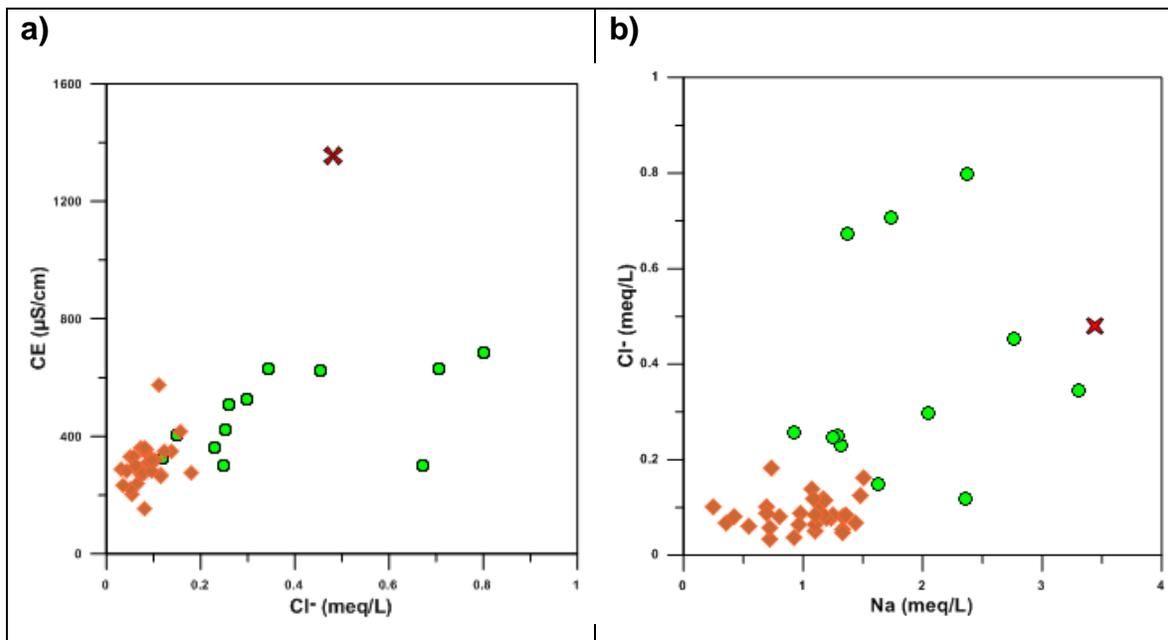


Figura 4.9 Diagramas de dispersión a) Cl vs CE y b) Na vs Cl.

4.1.7 Perfil Hidrogeoquímico

A través de los parámetros físicos podemos identificar la presencia de termalismo, las aguas del área de estudio se caracterizan por presentar temperaturas entre los 22,8 y 56°C, como se muestra en la Figura 4.10. En la cual se puede notar la fuerte presencia de termalismo en la parte norte el punto más caliente, que es el Geiser ubicada en la localidad de Uxtejhé, en el municipio de Tecozautla y los límites del estado de Querétaro. Como en los procesos descritos anteriormente, nos indican es el punto más extremo presente en la zona de estudio.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura y todos los componentes presentes en el agua, son factores importantes para establecer la calidad del agua y saber las características químicas presentes en el acuífero.

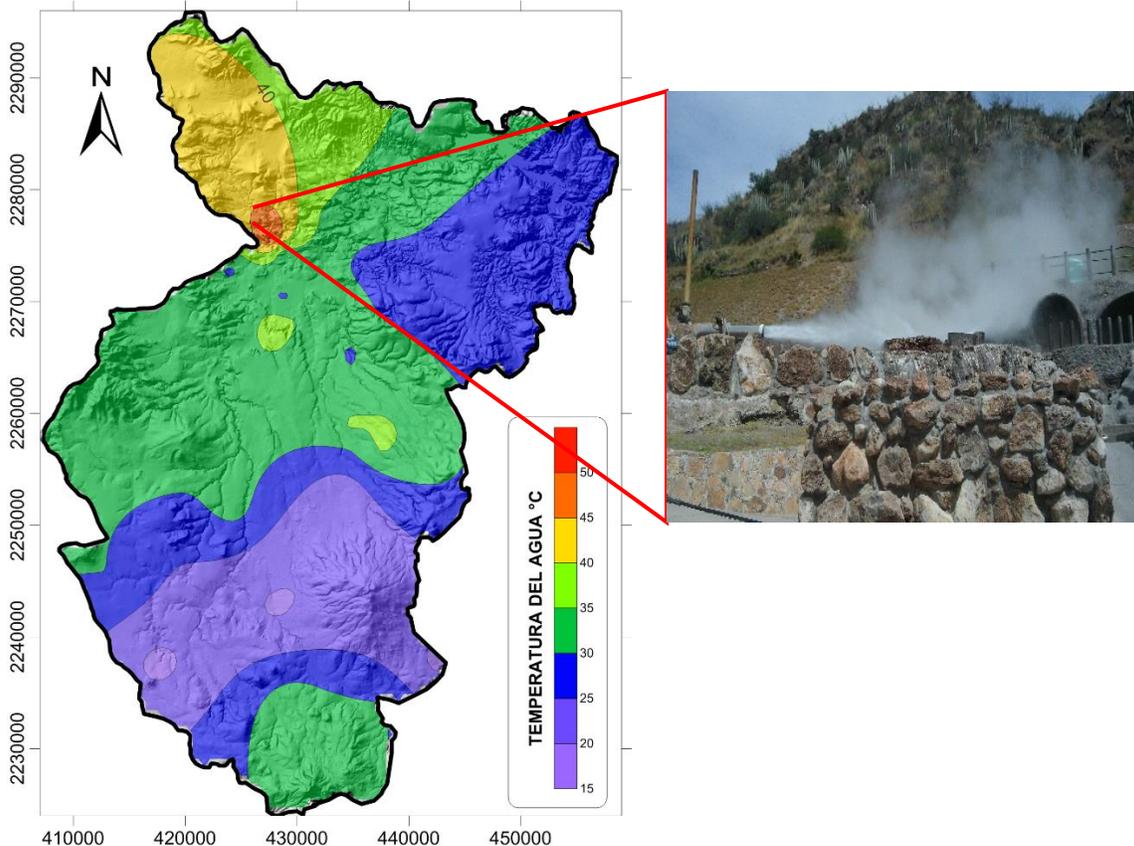


Figura 4.10 Distribución de la temperatura del agua subterránea.

En la Figura 4.11, se grafica la temperatura, sulfatos, cloruros y la conductividad eléctrica, comparado con la sección hidrogeológica F-F', en donde se observan dos zonas; en la primera zona, se aprecian valores de las concentraciones y temperatura bajos que se encuentran asociados a la zona de recarga; en la otra zona se aprecian valores altos, con concentraciones constantes, en lo cual se asocia al fracturamiento presente en la zona como se puede observar en el en la sección hidrogeológica. Este cambio en los valores de las concentraciones, es derivado de la mezcla con el agua hidrotermal.

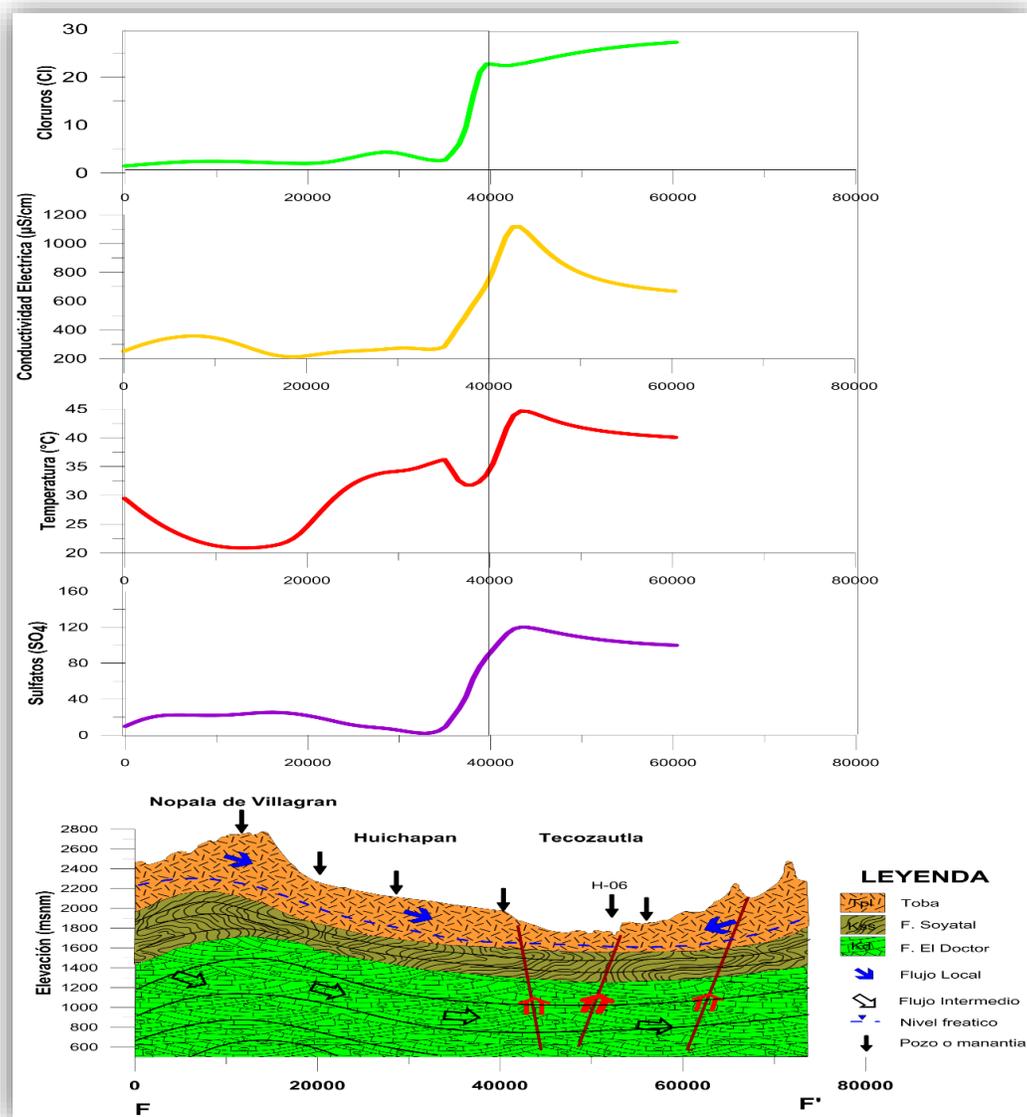


Figura 4.11 Perfil hidrogeoquímico e hidrogeológico de SE-NW.

Además que concentraciones bajas, están relacionadas con la zona de recarga en donde hay presencia de aguas menos evolucionadas. En el caso de la zona de descarga, las concentraciones presentan valores altos y aguas más evolucionadas. En tanto que en el flujo intermedio, el proceso de mezcla de agua es generado por el fracturamiento de la zona.

En la hipótesis, se estableció que la caldera de Huichapan puede ser una fuente importante del termalismo presente en la región. Sin embargo, los resultados muestran que el mayor número de aprovechamiento tiene características del flujo local y un menor porcentaje representa una mezcla con el agua hidrotermal.

4.2 Calidad del Agua

La calidad de agua subterránea dentro de la zona de estudio, se determinó a través de 45 muestras de aguas analizadas, provenientes de pozos y manantiales.

4.2.1 NOM 127-SSA1-1994

Con base en la NOM-127-SSA1-1994 (2000), se establece que todas las muestras analizadas se encuentran por debajo del límite máximo permisible, por lo que se considera de buena calidad para uso y consumo humano. Únicamente la muestra H-06 (Geiser de Pathé, Tecozautla) presento valores en los contenidos de sodio y sulfatos, pero dentro del límite máximo permisible.

4.2.2 Índice de Calidad del Agua (ICA)

El ICA es un factor importante, debido a que es necesario conocer las características del agua presente en la zona de estudio. Por lo que utilizar este sistema cualitativo nos permite hacer comparaciones de los niveles de contaminación en diferentes áreas. De igual manera nos define el grado de contaminación del agua en el momento del muestreo, expresado como un

porcentaje de agua pura. Por lo que agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual al 0% y de 100% para el agua en excelente condiciones.

En la Figura 4.12, se ilustra la distribución del ICA, y de acuerdo a la tabla 4.1, se obtiene que el 56 % de las muestras colectadas es de calidad aceptable, por lo que para su consumo solo se requiere de una purificación menor. Mientras que el 27% de las muestras obtenidas se clasifican en levemente contaminadas y un 16% como contaminada, para estos casos es necesario realizar un tratamiento de potabilización, antes de su consumo.

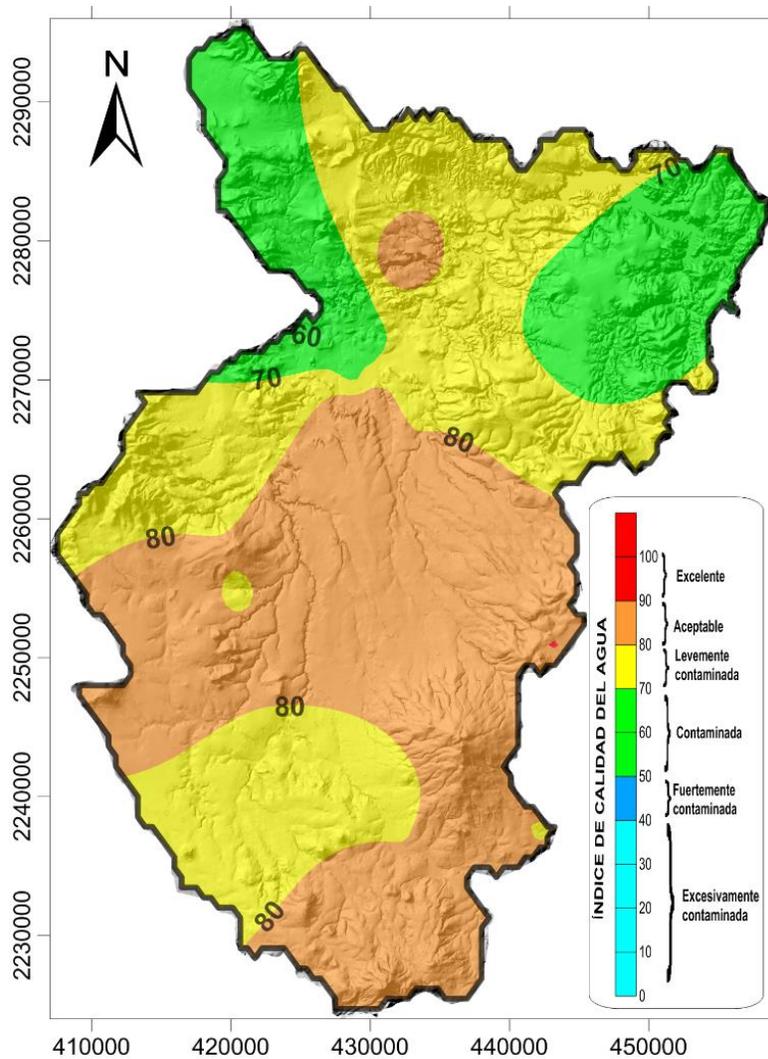


Figura 4.12 Mapa del Índice de calidad del agua (ICA).

Tabla 4.1 Clasificación del ICA en las muestras colectadas

CLASIFICACIÓN	RANGO ICA	USO	% DE MUESTRAS
Excesivamente contaminada	0-39	Inaceptable para consumo	0
Fuertemente contaminada	40-49	Dudoso para su consumo	0
Contaminada	50-69	Tratamiento de potabilización indispensable	16
Levemente contaminada	70-79	Dudoso su consumo sin purificación	27
Aceptable	80 - 89	Requiere purificación menor	56
Excelente	90 - 100	No requiere purificación para su consumo	2

4.2.3 Índice de Contaminación (ICON)

Los valores del ICON calculados el acuífero superior, son negativos, lo cual nos indica que no tiene problemas de contaminación, como lo ilustra la Figura 4.13. Sin embargo, la muestra del geiser, presenta valores que parecieran indicar contaminación, en este caso el agua es azufrosa, por lo tanto, esto resalta como un punto posible de contaminación, pero no lo es de acuerdo a la clasificación que se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados del ICON para las muestras analizadas.

CONTAMINACIÓN	RANGO ICON	% de muestras
Baja	≤ 1	100
Media	1-3	0
Alta	≥ 3	0

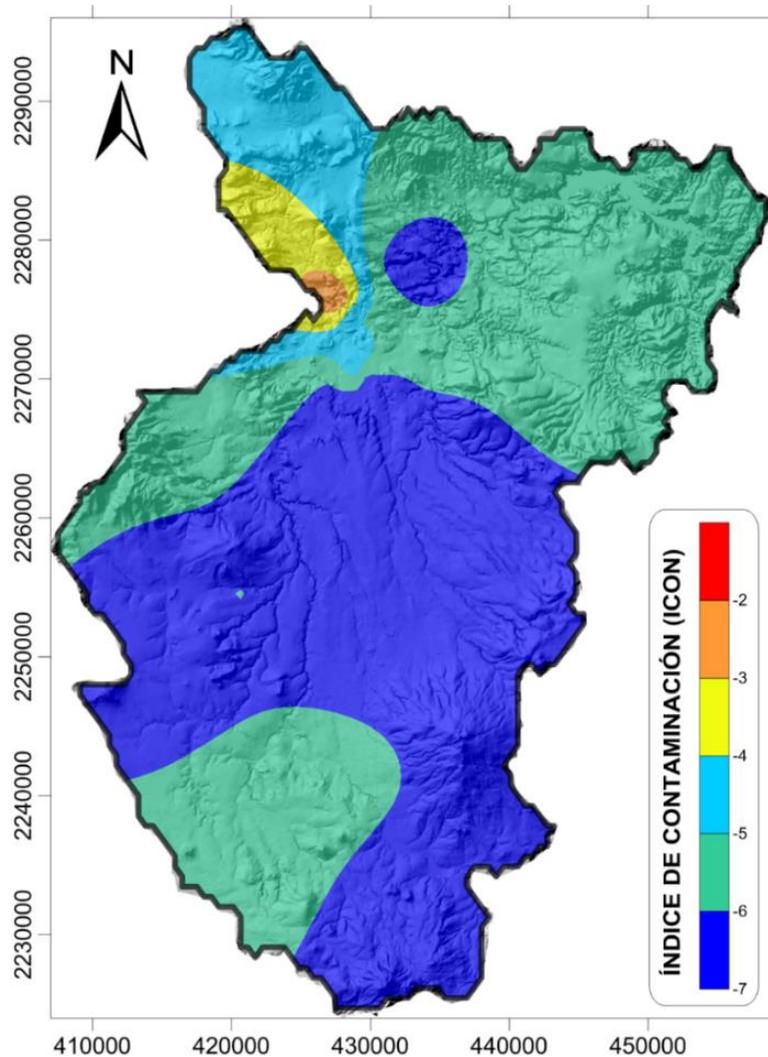


Figura 4.13 Mapa de distribución del Índice de Contaminación (ICON)

4.2.4 Calidad del agua para riego

En lo que se refiere al potencial que tiene el agua para uso de riego agrícola, se obtuvo la clasificación del agua de riego de acuerdo a la Norma Riverside, ilustrada en la Figura 4.14, esto nos indica que la calidad del agua para riego es buena, es decir, 5 muestras se encuentran en la clasificación S1C1 y 39 muestras se clasifican como S1C2, en general son aptas para la actividad agrícola. Solo se obtuvo un punto extremo que es el del Geiser y que su clasificación es C3S4 y que no podría ser utilizada en la agricultura, ya que podría generar problemas futuros por su mala calidad.

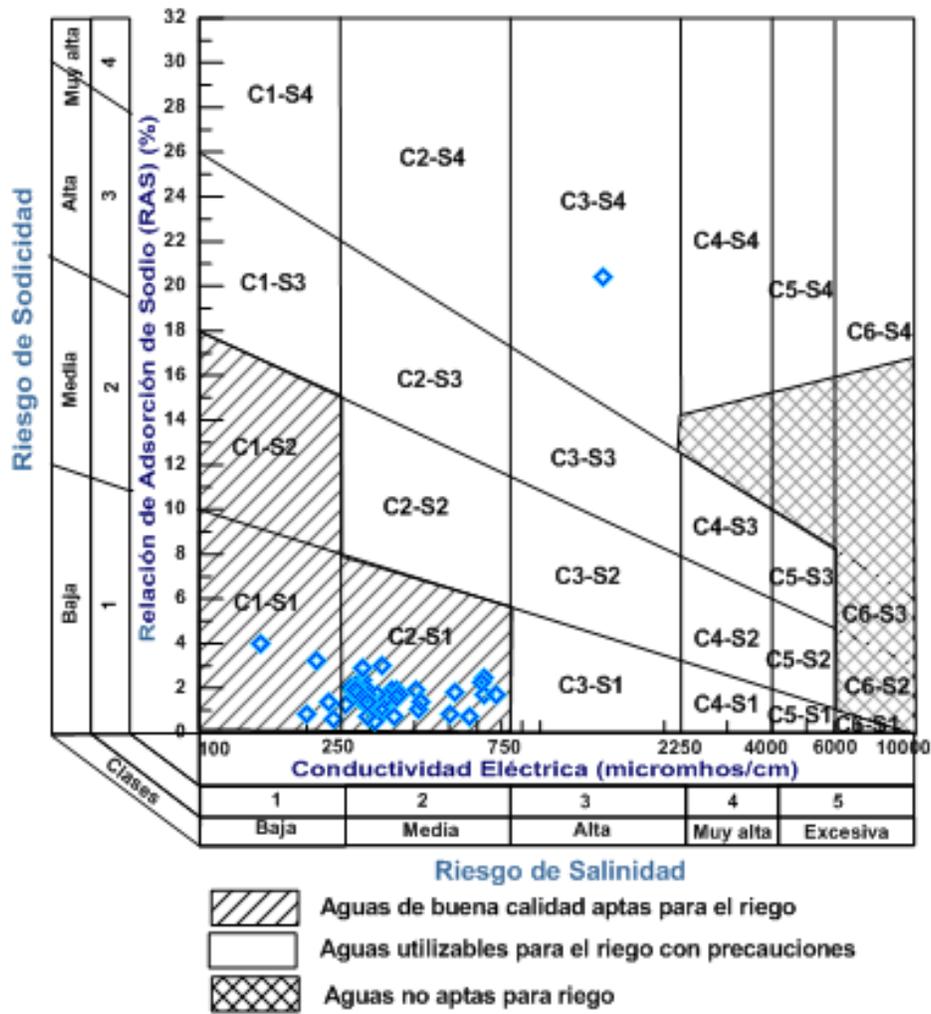


Figura 4.14 Clasificación de las aguas para uso agrícola.

En el diagrama de Wilcox (Fig. 4.15), se tiene que la mayoría de las muestras se encuentran con calidad de excelente a buena. Sin embargo, se puede observar que ya hay 4 muestras que se encuentran en el límite para lo permisible y dudosa. En donde el geiser, es considerado de calidad inadecuada para uso agrícola.

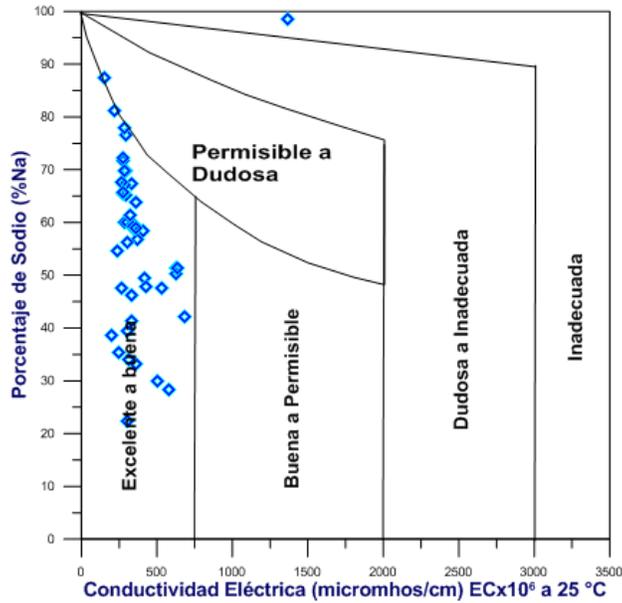


Figura 4.15 Diagrama de Wilcox de las muestras de agua subterránea.

En la Figura 4.16, se graficó la relación de Kelly aplicando la fórmula 3.5, la cual está en relación con el calcio y magnesio presente en el agua. Al aplicar la relación se obtuvo que en el 55% de las muestras colectadas, es inadecuado y el 45 % es adecuado. Teniendo al igual que en los otros diagramas, el valor de la muestra colectada en el geiser, es el más elevado.

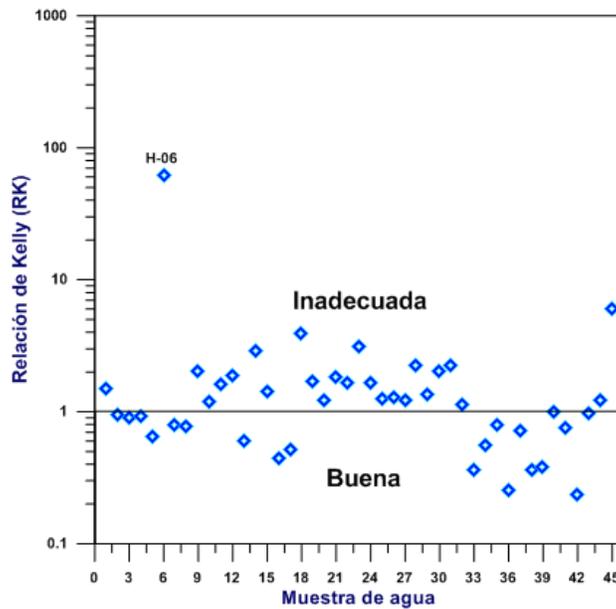


Figura 4.16. Relación de Kelly de las muestras de agua subterránea.

Para el caso de la calidad del agua de uso agrícola, se aplicaron tres distintas formas para determinar la calidad del agua, esto con la finalidad de que si solo se aplica una sola clasificación, el resultado obtenido es ambiguo, debido a que cada método establece diferentes criterios y límites permisibles, por lo que en un método nos puede indicar que la calidad del agua es excelente para aplicar a los cultivos. Sin embargo, como se puede observar en el presente trabajo, es importante realizar este tipo de análisis, para saber si la calidad del agua es adecuada para la agricultura. De igual manera esto permite al productor saber que fertilizantes aplicar, principalmente para evitar problemas de salinidad en el suelo.

4.3 Vulnerabilidad Acuífera

Los resultados obtenidos para los parámetros descritos en la metodología para la vulnerabilidad acuífera con el método SINTACS, se obtuvieron en la región de Huichapan-Tecozautla. Esto con la finalidad de medir el grado de vulnerabilidad al que puede estar sujeto el acuífero por actividades naturales o antrópicas (Civita y De Maio, 2000). Los parámetros del método se describieron en la metodología y los resultados se detallan a continuación.

4.3.1 (S) Profundidad del Agua

La profundidad del nivel piezométrico (S), se obtuvo con respecto al nivel del terreno. Representa la distancia que un contaminante debe atravesar desde la superficie del terreno, hasta el nivel del agua. Los datos de las profundidades fueron tomados del estudio de Lesser (2006), proporcionados por el COTAS Huichapan Tecozautla.

El método SINTACS, utiliza una profundidad máxima de 100 metros, en este caso los pozos estudiados son mayores a 200 m, como se observa en la Figura 4.17.

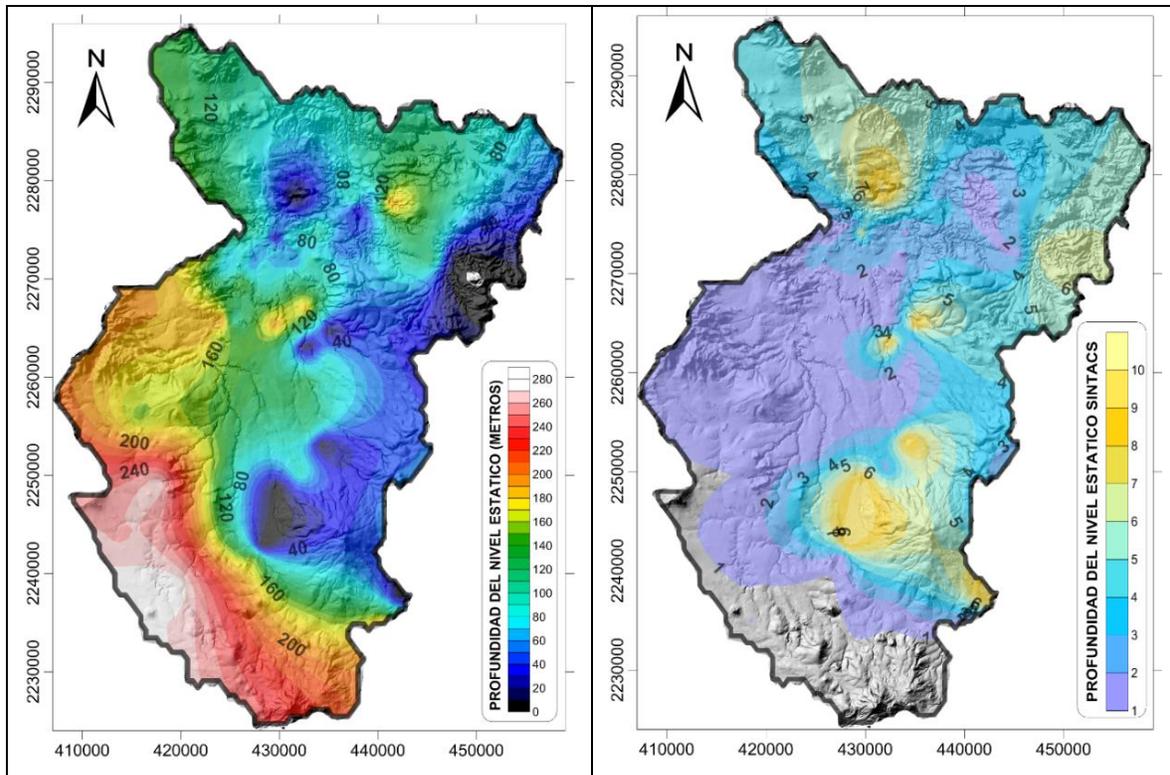


Figura 4.17 Profundidad del nivel estático (S) y su índice de vulnerabilidad asociado.

Al realizar el análisis de datos piezométricos, se obtuvo que la máxima profundidad es de 278.15 metros, que al aplicar la metodología, se obtiene un valor ponderado de 10 y la profundidad mínima, es la asignada a los manantiales en este caso es de 0 metros, por lo que a este se le asigna el valor de 1. Los manantiales están ubicados en Nopala y Huichapan en la zona de recarga.

4.3.2 (I) Infiltración Eficaz

Los datos para determinar la infiltración efectiva, se obtuvieron de las estaciones climatológicas que reporta la CONAGUA, con un periodo de 1951 hasta 2010, la precipitación media anual es de 550.5 mm y la temperatura media es: 15.7 °C, como se muestra en la Tabla 1.1. La infiltración eficaz, se obtuvo aplicando las ecuaciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. Posteriormente se le asignaron los valores de acuerdo a los criterios de la metodología SINTACS (Fig. 3.14), como resultado en la Figura 4.18,

se observa que el máximo valor obtenido es de 6 con una precipitación eficaz de 145 mm/año, en la que la parte sur de la zona de estudio, que corresponde con la zona de recarga.

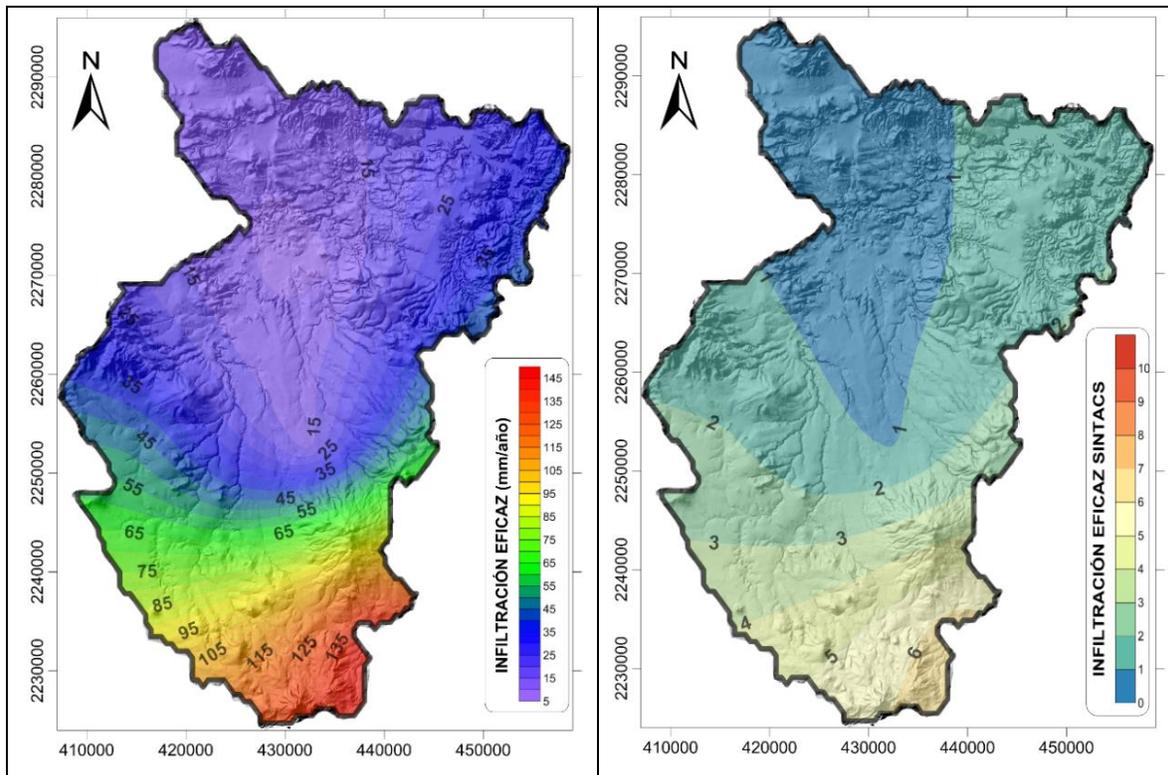


Figura 4.18 Infiltración eficaz (I) y su índice de vulnerabilidad asociado.

4.3.3 (N) Zona No Saturada

La determinación del parámetro relacionado a la zona no saturada (vadosa), fue obtenida usando la información para la descripción litológica de la región y las secciones geológicas. La zona no saturada, está compuesta por material no consolidado y asentado en rocas volcánicas principalmente.

Los valores altos de 8 y 9 que se observan en la Figura 4.19, están asociados a material como basalto y aluvión. En general, el acuífero superior de Huichapan-Tecoautla, se encuentra en material volcánico.

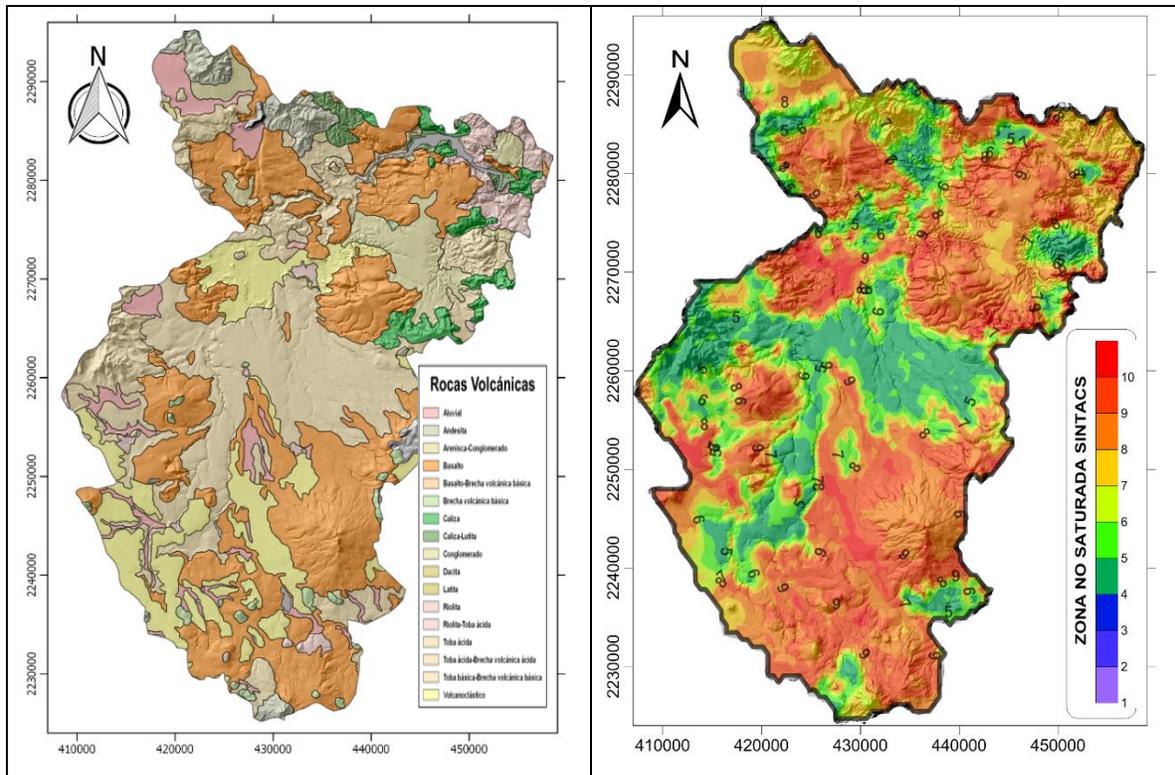


Figura 4.19 Unidades geológicas de la zona no saturada (N) e índices de vulnerabilidad asociado.

4.3.4 (T) Tipo de Suelo

Los diferentes tipos de suelos fueron obtenidos de mapas edafológicos, los valores asignados en este caso para (T) en Figura 4.18, se asignaron los valores altos, en debido a que se encuentran sobre material volcanico con ausencia de suelo. Los valores bajos fueron asignados en donde se encuentran las arcillas y limos.

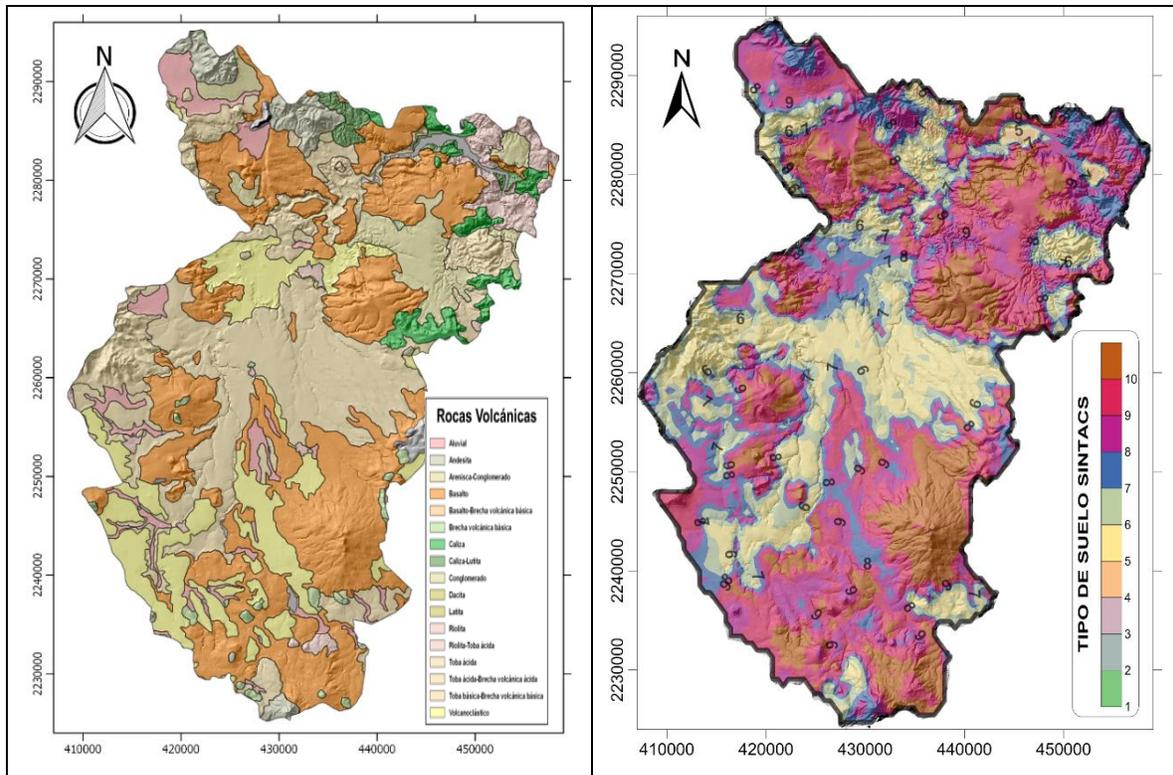


Figura 4.20 Tipo de suelo (T) e índices de vulnerabilidad asociado.

4.3.5 (A) Características Hidrogeológicas del Acuífero

Basado en la geología obtenida del INEGI y SGM, el medio acuífero fue clasificado de acuerdo al tipo de roca presente en la zona de estudio, en este caso se clasificaron en 12 paquetes: aluvial, andesita, arenisca-conglomerado, basalto, basalto-brecha volcánica, brecha volcánica, caliza, caliza-lutita, conglomerado, dacita, latita, riolita, riolita-toba ácida, toba ácida, toba ácida-brecha volcánica básica y vulcanoclástico del cual el rango asignado fue de 4 a 10 como se observa en la Figura 4.19.

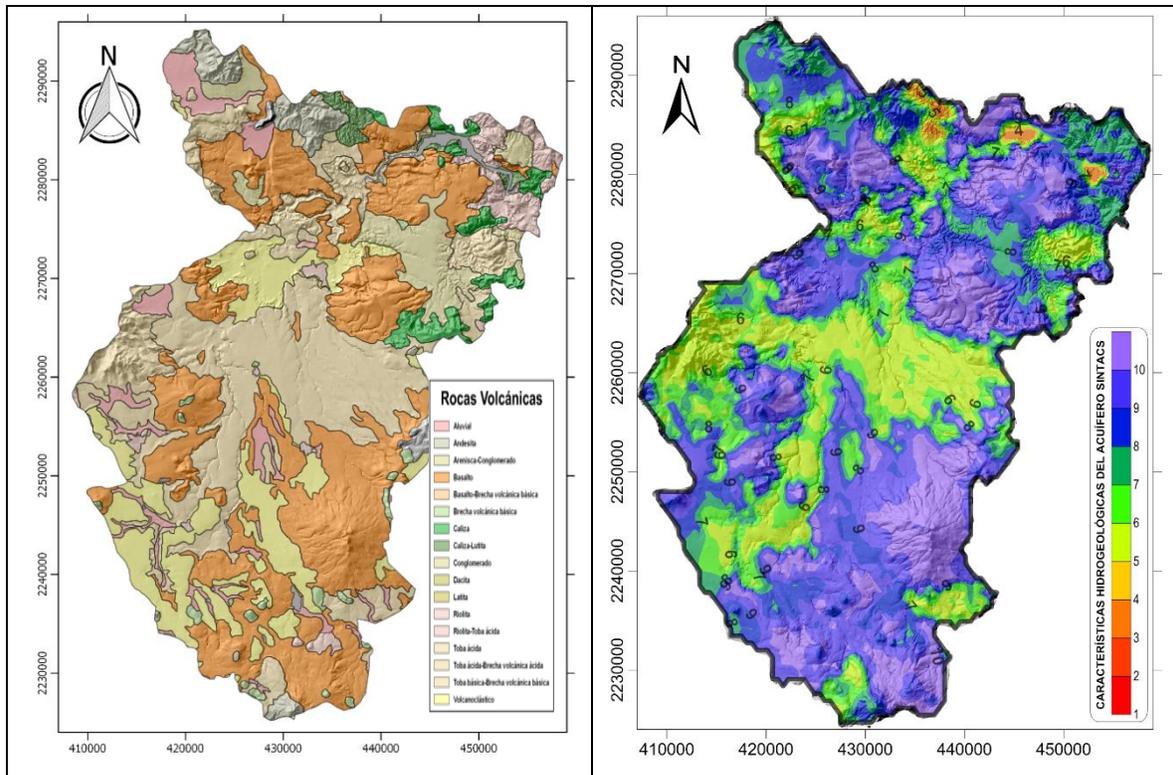


Figura 4.21 Unidades Hidrogeológicas (A) e índice de vulnerabilidad asociado.

El principal acuífero que está siendo explotado, es el superior, que se encuentra en material volcánico, descrito en este parámetro. Los valores asignados por las rocas volcánicas y los valores bajos, se deben a la presencia del aluvial.

4.3.6 (C) Conductividad Hidráulica del Acuífero

Los datos de la conductividad hidráulica, fueron obtenidos de valores utilizados en la literatura, como los materiales presentes en la zona corresponden material de origen volcánico. Los valores son altos ya que se encuentran sobre rocas volcánicas, principalmente en los basaltos; en particular, los valores más altos están en la zona de fallas.

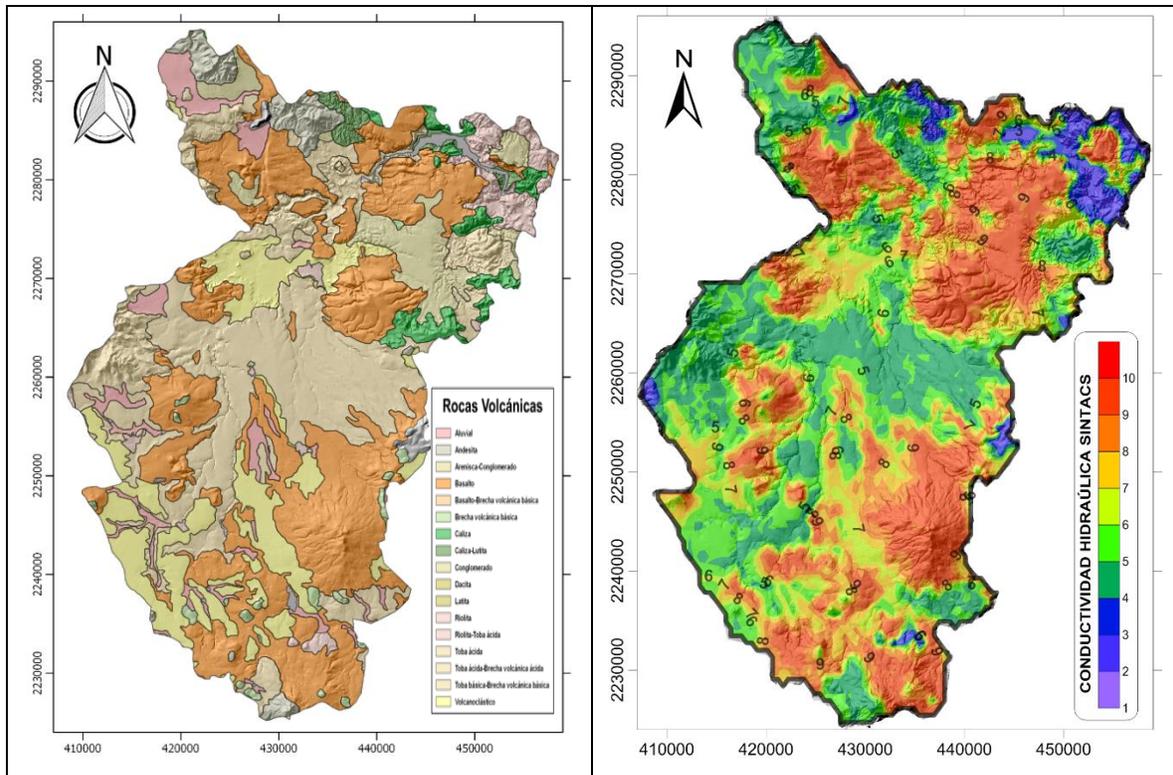


Figura 4.22 Unidades hidrogeológicas y su Conductividad hidráulica (C) asociada.

4.3.7 (S) Pendiente de la Superficie Topográfica

El modelo digital de elevación (DEM), utilizado para obtener los datos de la pendiente topográfica, para la zona de estudio, en esta zona los valores de pendiente son altos debido a la fisiografía del lugar, por lo que las pendientes en algunas zonas son muy grandes, por ejemplo en Nopala y Huichapan. Existen algunas excepciones ocasionas por las laderas en la que se forman los ríos, en este caso los ríos Tula, San Juan y el San Francisco, que son los principales en esta zona. Los valores de la pendiente son del 24% en la zona cerril y del 0% en la zona del valle.

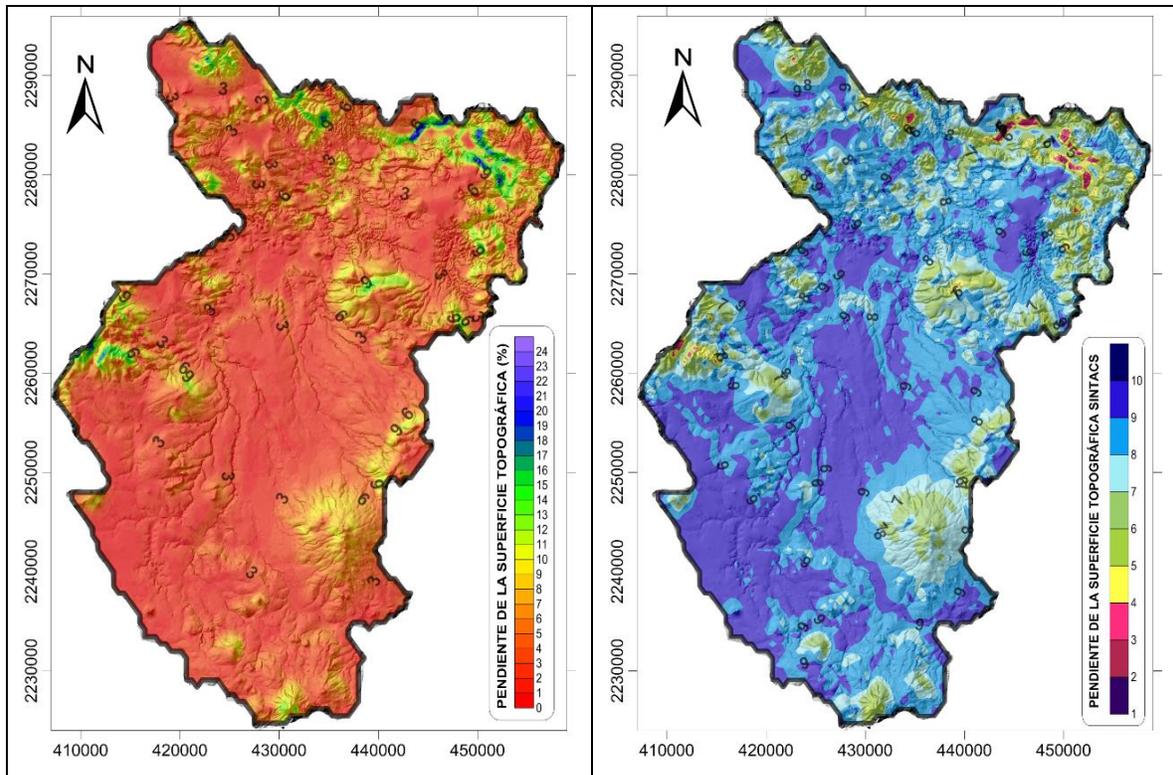


Figura 4.23 Superficie topográfica (S) y su índice de vulnerabilidad asociado.

4.3.8 Índice de Vulnerabilidad Normalizada

Para la asignación del peso (W) se aplicó la condición específica de impacto relevante (IR), debido a que en la zona la principal actividad es la agricultura, por lo tanto la aplicación de fertilizantes y plaguicidas que pueden ser un factor que influya en la contaminación del acuífero si la dosis de aplicación exceden lo requerido a los cultivos.

Después de haber obtenido rango paramétrico (P) asignado de acuerdo a la metodología y haber el asignado el peso (W) en cada parámetro, se realizó a través de álgebra de mapas, el producto para cada parámetro y después se realizó la sumatoria de todos los parámetros, para este caso el valor mínimo obtenido es 100 y 235 como máximo, para el caso en específico de impacto relevante (IR).

El resultado de la normalización, se observa en la Figura 4.21, la cual nos indica el grado de vulnerabilidad expresado en porcentaje. Los valores altos de la suma que en el mapa tiene colores naranja y rojo, representan potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuífero.

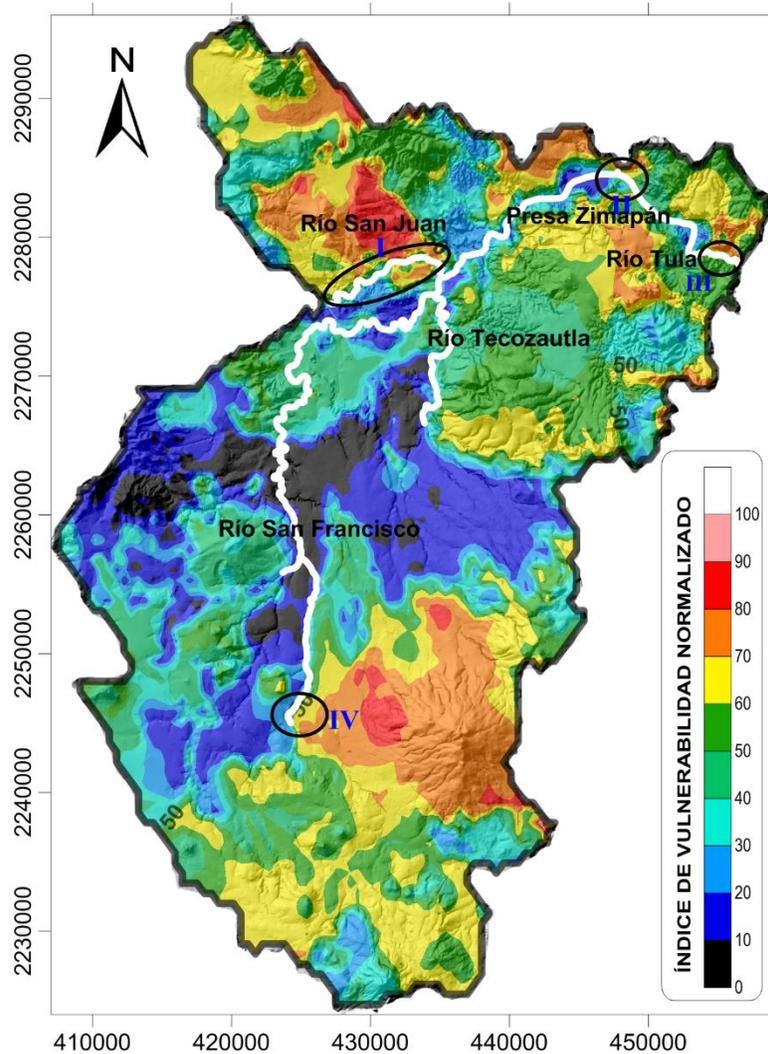


Figura 4.24 Mapa de vulnerabilidad con el método SINTACS Normalizado, representando las zonas más vulnerables a las actividades agrícolas y fuentes contaminantes más importantes.

El mapa de vulnerabilidad normalizado, nos ayuda a tener una mejor interpretación. Con base a ello, la vulnerabilidad acuífera para el acuífero superior, establece una relación directa con los parámetros del método SINTACS, por lo que nos indica que

la zona más vulnerable, es la zona de recarga en Huichapan y en la parte Este de Tecozautla.

En este caso la vulnerabilidad, afecta solo al acuífero superior, en el paquete volcánico, la mayor actividad agrícola se encuentra en el municipio de Tecozautla, por lo tanto es en donde hay mayor vulnerabilidad a ser contaminada, por el uso de fertilizantes y agroquímicos (Fig. 4.22). Si el uso de fertilizantes, no es utilizado con moderación en Huichapan, afecta la zona de recarga, la cual tiene por el momento una calidad aceptable y en otras ya presenta contaminación.

Así mismo, el conocer esta información de la vulnerabilidad acuífera para la región, nos deja con una amplia visión de la situación en la que se encuentra el acuífero, debido a que al igual que sus zonas de recarga son importantes, también lo son las presas y los ríos de la región. Cercano a esta zona se encuentra la presa Zimapán, que de acuerdo al diagnóstico preliminar del estado de las afectaciones ambientales Potenciales asociadas a la Presa Zimapán, (Rodríguez, et al., 1999), es una de las presas más contaminadas, debido a que además de sus afluentes que llevan contaminantes de domésticos y de descarga de drenajes, que vienen de las aguas residuales de la Cd. de México.

Se identificaron cuatro puntos vulnerables, debido a que convergen los ríos Tula, San Juan, Tecozautla, San Francisco y la presa Zimapán con problemas de contaminación en zonas de alta vulnerabilidad.

5. CONCLUSIONES

1. Se identificaron dos principales tipos de agua, una bicarbonatada sódica y otra bicarbonatada cálcica, el primer tipo se encuentra en la zona de descarga y el segundo tipo en la zona de recarga.
2. Los procesos más importantes del acuífero es la interacción agua-roca, la mezcla y en algunas muestras, el efecto de evaporación.
3. Se identificaron tres tipos de flujo, un local, otro regional y un intermedio. El flujo local está asociado a la zona de recarga. Las aguas más evolucionadas o de flujo regional se localizan al norte del área de estudio en el Geiser (Pathe). Para el caso del flujo intermedio se localizan en Tecozautla, muy cercanas al flujo regional.
4. La actividad hidrotermal, es una componente importante en el funcionamiento para el sistema acuífero Huichapan-Tecozautla, debido a que aporta volúmenes importantes al sistema.
5. El principal acuífero que se explota, es el relleno vulcano-sedimentario que cubre los valles de la región. Las calizas que se encuentran debajo de este relleno no están siendo explotadas, debido a que se encuentran a profundidades mayores a 500 metros.
6. De acuerdo al ICA obtenido en el acuífero superior, la mayor cantidad de muestras tiene calidad aceptable para consumo humano.
7. El ICON para el acuífero superior, indica que no tiene problemas de contaminación.
8. La calidad del agua para riego en general es buena. Con el diagrama de Wilcox se encuentran con calidad de excelente a buena y se observa que ya hay 4 muestras que se encuentra en el límite para lo permisible y dudosa. Con respecto a la relación de Kelly, el 55% de las muestras colectadas es inadecuada y el 45 % es adecuado.
9. Derivado de la aplicación de varios índices para uso agrícola, se encontró que si solo se aplica una sola clasificación, el resultado obtenido es ambiguo,

mientras que usando otros índices es posible detectar en algunos casos, un uso restringido para esta actividad.

10. La vulnerabilidad acuífera utilizando el método SINTACS permitió identificar las zonas con mayor riesgo a ser contaminadas en la zona de recarga de Huichapan y en la parte Este de Tecozautla.
11. La principal actividad económica, es la agricultura, por lo que el acuífero es vulnerable a la contaminación por agroquímicos. Asimismo, los aprovechamientos superficiales, como el caso de ríos San Juan, Tecozautla, San Francisco, Tula y la presa Zimapán, generan un riesgo potencial al acuífero, por el grado de contaminación presentes en estos.

6. RECOMENDACIONES

- 1.- Realizar un estudio para determinar la viabilidad de la extracción de agua subterránea del acuífero profundo, debido a que este en la actualidad no se ha explorado.
- 2.- Proponer a la población medidas de protección en la zona de recarga, debido a que en esta zona se tiene una alta vulnerabilidad acuífera, por lo que, es de vital importancia su cuidado para que la calidad del agua no se vea afectada.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson Bortolin, Taison., Roehe Reginato, Pedro Antonio., Imério Leão, Marcos., Schneider, Vania Elisabete. 2014. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. SSN 1980-993X, marzo 2014.
- Aguilera C., M.; Martínez E., R. (1996). Relaciones agua-suelo-Planta-atmósfera. Editorial Universidad Autónoma de Chapingo. México
- Amaya Arévalo, Álvaro Josué. Evaluación Hidrogeoquímica e Hidroquímica de la Subcuenca del Río Aranchacal. Universidad de el Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Posgrado .Tesis de Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos, 2015.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., y Bennett, T. (1985). DRASTIC: A standard system for evaluation groundwater pollution using hydrugeologic settings. EPA/600/2-85/0-18 US EPA.
- Backman, B. Bodis, D. Lahermo, P., Rapant, S., y Tarvainen, T. 1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. Environmental Geology, 36 (1-2), 55-64 p.
- Brown, R., McClelland, N., Deininger, R. y Tozer, R (1970). A water quality index-do we dares? Water and sewage Works.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La Plataforma Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23(1-6), 102 p.
- Civita 1997
- Civita M. y De Maio M. (2000). Valutazione e cartografia automática della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema paramétrico SINTACS R5, Pitagora, Bologna, Italia, 226 p.
- Custodio, Emilio. Hidroquímica. En: CUSTODIO, Emilio y LLAMAS, Manuel. Hidrología subterránea, segunda edición. Barcelona: Ediciones Omega, 2001 p 1007 – 1095.

- Del Valle F., H. 1992. Prácticas de relaciones agua-suelo-atmósfera. Editorial Universidad Autónoma de Chapingo. México
- Gómez-Tuena Arturo, Orozco-Esquivel Ma. Teresa, Ferrari Luca, 2005. Petrogénesis Ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, Núm. 3, 2005, p.227-283.
- Fernandez –Vitora, V. C. 2009. Guia metodologica para la evaluación del impacto ambiental: Mundi –pensa libros
- Foster, S. and Hirata, Ricardo. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 81 pp
- INEGI, 2010. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Hidalgo Clave geoestadística 13029, 13059 y 13044. Retrieved from: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>
- Jairo, R (2009). Calidad del Agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Tercera Edición. Bogotá.
- Kelley, W. P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. Soil Sci., 95, 385-391.
- Lesser y Asociados. Estudio de Isótopos y funcionamiento del sistema acuífero huichapan-tecozautla, hgo. (2007). (Actualización del Acuífero Huicapan- Tecozautla, 2006).
- LaMotte Operator's Manual Smart 2 colorimeter. 2001. 53 pp
- Lloyd J.W. and Heathcote J. A, 1985. Chemistry of groundwater, Oxford University Press, New York, 293 p.
- Martínez de Bascaran, G., 1979. Establecimiento de una metodología para conocer la calidad del agua. Boletín informativo del medio ambiente.
- Moran Ramírez, Janete. (2012) Conexiones Hidráulicas de Cuencas Hidrogeológicas en La Sierra Madre Oriental Aplicando Modelos Hidrogeoquímicos. Tesis de Maestría en Ciencias aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT).
- Moran Ramírez, J., & Ramos Leal, J. A. (2014). The VISHMOD Methodology with Hydrochemical Modeling in Intermountain (Karstic) Aquifers: Case of the

- Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal of Geography and Geology*, 6 (2).
- NOM-127-SSA1 (1994). Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Salud ambiental.
 - Palacios, V.O. y N.E. Aceves. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México
 - Porta, J., y López Acevedo, M. (2010). Introducción a la edafología: uso y protección del suelo (2da. Ed.), Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España
 - Perkin-Elmer, (1990), Manual Plasma 400 Sequential ICP-OES Spectrometer
 - Ramos Leal, J. A. 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. UNAM. 2002. 8-9 p.
 - Ramos-Leal JA, Noyola-Medrano C, Tapia-Silva FO (2010) Acuífero vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. *Environ Earth Sciences*, published online doi: 10.1007/s12665-009-0434-5
 - Richards, L-A (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washinton: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA. Agriculture Handbook, 60.
 - Rodríguez-Castillo Ramiro, Cortes-Silva Alejandra, Ramos-Leal JA. 1998. Diagnostico Preliminar del Estado de las Afectaciones Ambientales Potenciales Asociadas a la Presa Zimapán, Departamento de Recursos Naturales, Instituto de geofísica, UNAM.
 - Sappa G. Vitale S., 2001 "Groundwater Protection: Contribution from Italian Experience", Ministerio del medio ambiente, Roma.
 - Segerstrom, K., 1961, Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noroeste del estado de México: Boletín de la Asociación mexicana de Geólogos Petroleros, 13(3 y 4), 147-168 p.
 - Songlin Cheng, 1988. Trilinear diagram revisited application, limitation, and an electronic spreadsheet program: *Ground Water* Vol. 26, No. 4: 505-510pp.

- Turc L (1954) Le Bilan D'Eau Des Sols. Relations Entre Les Precipitations, L'Evaporation Et L'Ecoulement. Ann Agro: 5–131.
- Valcarce O.R., Carrasco P.H., Jiménez H.S. (2001). Aplicación de la metodología GOD modificada, para el estudio de la vulnerabilidad del acuífero cárstico cuenca sur de la Habana, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología, Toluca México.
- Wilcox, L. V. (1948). The quality of water for irrigation use. Technical Bulletin No.962, 40.
- Wilcox, L. V. (1955). Classification and use of irrigation waters.
- Wilson, B.W., Hernández, J.P., Meave, E., 1955, Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 18(1), 1-10 p.
- Wilson Albert, R., 1991. Environmental risk: Identification on Management, Lewis Publisher Inc.