



IPICYT

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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del
Valle de Tehuacán**

Tesis que presenta
Karla Pérez Avila

Para obtener el grado de
Maestra en Geociencias Aplicadas

Director de Tesis:
Dr. José Alfredo Ramos Leal

Codirectora de Tesis:
Dra. Rosa María Fuentes Rivas

Asesoras:

Dra. Janete Morán Ramírez

Dra. Mayla Alheli Ramos Vázquez

San Luis Potosí, S.L.P., 10 de julio de 2023



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del Valle de Tehuacán**” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Karla Pérez Avila** y aprobada el **día de mes de año** 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

Dra. Rosa María Fuentes Rivas
Codirector de la tesis

Dra. Janete Morán Ramírez
Miembro del Comité Tutorial

Dra. Mayla Alheli Ramos Vázquez
Miembro del Comité Tutorial



IPICYT

Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en las instalaciones de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección del Dr. José Alfredo Ramos Leal y la Dra. Rosa María Fuentes Rivas.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (1137686) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Página en Blanco que se va a utilizar para colocar la copia del acta de examen.

Dedicatoria

A mi padre abuelo, Gaudencio Avila. Te dedico esta tesis en agradecimiento por haber llenado del amor más puro mi infancia y parte de mi juventud, porque tu recuerdo me da valentía en los momentos difíciles. Siempre estarás presente para mí.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Dr. José Alfredo por abrirme las puertas y motivarme a seguir en esta línea de investigación. Le agradezco sus valiosas enseñanzas, apoyo, tiempo y compromiso para la realización de este trabajo y con cada etapa de mi formación de maestría.

Gracias Dra. Rosa María por su amplia disposición y apoyo brindado para la realización de este trabajo de tesis, sus retroalimentaciones siempre fueron pieza clave para lograr concluir este trabajo.

Gracias Dra. Janete por compartirme sus valiosos conocimientos en el área de la hidrogeoquímica, por su paciencia y dedicación. Valoro mucho el apoyo brindado para el trabajo de campo y el procesamiento de mis muestras.

Gracias Dra. Mayla por abrirme el panorama para la realización de mi trabajo de tesis, sus aportes siempre fueron de gran ayuda.

Mamá eres el pilar más importante en mi vida, mi mayor ejemplo de superación, te amo y admiro. Gracias por motivarme y creer siempre en mí y en que puedo lograr todo lo que me proponga.

Gracias abuela Ana por tu dedicación a lo largo de mi vida, por tus sabios consejos, cariño y comprensión. Has sido mi guía desde siempre y eres muy importante para mí.

Gracias tía Yuva por estar siempre presente para mí. Eres una persona extraordinaria que ha llenado de amor y alegría cada etapa de mi vida.

Gracias a mis amigos del IPICYT por los consejos, las risas y el apoyo en esta etapa tan enriquecedora de mi vida.

Gracias a los investigadores del área de geociencias, por haberme compartido sus conocimientos, por su compromiso día con día con la ciencia y hacer de este mundo un lugar mejor.

Un agradecimiento al IPICYT Y CONAHCYT por el apoyo para realizar esta maestría.

Contenido

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 ANTECEDENTES	3
1.6 ÁREA DE ESTUDIO	6
1.7 CLIMA	7
1.8 FISIOGRAFÍA	8
1.9 VEGETACIÓN Y USO DE SUELO	8
1.10 HIDROGRAFÍA	11
CAPÍTULO II MARCO HIDROGEOLOGICO	12
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL	12
2.2 ESTRATIGRAFÍA	12
2.3 HIDROGEOLOGÍA	25
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	28
3.1. ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL INICIAL	28
3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS HIDROGEOQUÍMICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO	28
3.2.1. Datos abiertos	28
3.2.2. Datos muestreados	29
3.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	30
3.3.1. Balance iónico	30

3.3.2. Elaboración de mapas de distribución de parámetros y diagramas hidrogeoquímicos .	31
3.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	38
3.4.1. Comparación con los Límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021- y la EPA	38
3.4.2. Cálculo de índices de calidad para consumo humano y clasificación	39
Tabla 1. Constantes asignadas para el ICA	40
Tabla 2. Valores porcentuales y pesos asignados para el ICA.....	40
Tabla 3. Clasificación de calidad para el ICA.....	41
Tabla 4. Clasificación de calidad para el ICON.....	42
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	43
4.1 MODELO CONCEPTUAL INICIAL.....	43
4.1.1 Evaluación geohidrológica de la permeabilidad	43
4.1.2 Secciones geológicas	52
4.2 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	54
4.2.1 Secuencia general de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos	54
Tabla 5. Estadísticas de los iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos.....	54
4.2.6 Distribución espacial de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos	55
4.2.3 Familias de agua	57
4.2.4 Sistemas de flujo de aguas subterráneas.....	58
4.2.5 Proceso hidrogeoquímico dominante en la zona de estudio.....	59
4.2.6 Identificación de procesos mediante diagramas bivariados.....	60
4.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	63
4.3.1 Comparación con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1, 2021 y la EPA (2023) 63	
Tabla 6. Porcentajes de muestras fuera de los límites permisibles establecidos por la NOM-127 (2021) y la EPA (2009)	65
4.3.2 Cálculo de índices de calidad para consumo humano	65
CAPÍTULO V DISCUSIÓN.....	67
5.1 Caracterización hidrogeoquímica.....	67
5.2 Calidad del agua subterránea para consumo humano	73
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES.....	78
REFERENCIAS	79

Lista de tablas

Tabla 1. Constantes asignadas para el ICA	40
Tabla 2. Valores porcentuales y pesos asignados para el ICA.....	40
Tabla 3. Clasificación de calidad para el ICA.....	41
Tabla 4. Clasificación de calidad para el ICON.....	42
Tabla 5. Estadísticas de los iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos.....	54
Tabla 6. Porcentajes de muestras fuera de los límites permisibles establecidos por la NOM-127 (2021) y la EPA (2009)	65

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	7
Figura 2. Clima, clasificación de Köppen para el área de estudio	8
Figura 3. Provincias Fisiográficas en la zona de estudio.....	9
Figura 4. Topoformas en la zona de estudio	10
Figura 5. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.....	10
Figura 6. Hidrografía en la zona de estudio	11
Figura 7. Mapa geológico y estructural de la zona de estudio.....	27
Figura 8. Ubicación de las muestras.....	30
Figura 9. Mapa de evaluación de permeabilidad en la zona de estudio.....	51
Figura 10. Perfil geológico A-A'	52
Figura 11. Modelo conceptual inicial	53
Figura 12. Perfil geológico B-B'	53
Figura 13. Perfil geológico C-C'.....	53
Figura 14. Mapas de distribución a) Ca_2 + b) Na + c) K + d) Mg_2 + e) Cl – f) CO_3 – g) HCO_3 – h) NO_3 – i) SO_4 – j) pH k) STD l) Temperatura.....	56
Figura 15. Diagrama de Piper	57
Figura 16. Tipos de flujos en la zona de estudio Figura 17. Interacción con rocas calcáreas o volcánicas en la zona de estudio	58
Figura 18. Diagrama de Mifflin.....	58
Figura 19. Diagrama de Gibbs, radio Cl –	59
Figura 21. a) Na + vs Cl – b) Na + vs Ca_2 ++ Mg_2 + c) Ca_2 ++ Mg_2 + vs HCO_3 –+ SO_4 –	60
d) Ca_2 +vs Mg_2 + e) Na ++ K + Cl – vs Ca_2 ++ Mg_2 + HCO_3 – SO_4 –	60
Figura 22. CCRindex vs Cl –/(Alk+ Cl –)	62
Figura 23. comparativa entre las concentraciones de iones mayoritarios y parámetros físicoquímicos con respecto a la NOM-127-SSA1, 2021 y a la regulación proveída por la EPA (2023).	64
Figura 24. Clasificación de contaminación en la zona de estudio mediante el ICA	66
Figura 25. Clasificación de contaminación en la zona de estudio mediante el ICON	66
Figura 26. Mapa de familias de agua subterránea en la zona de estudio.....	67
Figura 27. Mapa de sistemas de flujos de aguas subterráneas	68

Figura 28. Mapa de diferenciación de interacción con rocas calcáreas y volcánicas en la zona de estudio.....	69
Figura 29. Mapa geológico con muestras clasificadas por interacción con rocas calcáreas y volcánicas en la zona de estudio	69

RESUMEN

Caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del Valle de Tehuacán

PALABRAS CLAVE. Caracterización hidrogeoquímica, dirección de flujo, mezclas, interacción agua-roca, ICA.

El presente trabajo se desarrolla en su mayor parte en el sureste del Estado de Puebla, México en la zona denominada sistema acuífero del Valle de Tehuacán. Resalta la importante heterogeneidad litológica en el área, representada por la presencia de los tres tipos de rocas principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Como factores antropogénicos destacan la presencia de zonas urbanas y un distrito de riego; así como, las actividades agrícolas y ganaderas ampliamente extendidas. Se realizó una caracterización hidrogeoquímica basada en la integración de información de 45 muestras obtenidas de pozos y manantiales de las cuales se analizaron los iones mayoritarios: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- y los parámetros fisicoquímicos: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (STD), Alcalinidad y Temperatura. Los resultados obtenidos indican que la familia de agua predominante es la Na-Ca- HCO_3 -Cl seguida de las familias Na-Ca-Mg-Cl, Ca-Na-Mg- HCO_3 , y la Na-Mg-Ca-Cl, todas estas representativas de procesos de mezclas. Los principales procesos hidrogeoquímicos encontrados fueron la interacción agua-roca, mezclas, intercambio iónico, intercambio iónico inverso y en algunas muestras, destaca el proceso de evaporación. La mezcla principal queda representada hacia la zona centro del área de estudio en donde convergen flujos provenientes del noroeste asociados al sistema acuífero del Valle de Tecamachalco y del noreste que se relacionan con el deshielo del Pico de Orizaba y con las sierras altas impermeables. Se encontraron flujos locales, intermedios y regionales, también destaca el predominio de este último tipo de flujo hacia el sureste de la zona de estudio, lo que permitió asociar la evolución natural hacia esta dirección. Se encontró que el 87% de las muestras rebasan la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 en al menos algún ion mayoritario o parámetro fisicoquímico. Además, se obtuvieron los índices de calidad de agua para consumo humano ICA e ICON encontrando que la mayor extensión del área de estudio está clasificada como contaminada de acuerdo

con el ICA y presenta baja contaminación según el ICON. Estos índices también permitieron determinar que el agua de peor calidad se concentra hacia el sureste de la zona de estudio, coincidiendo con la dirección de evolución natural del agua subterránea determinada con la caracterización hidrogeoquímica.

ABSTRACT

Hydrogeochemical characterization of the aquifer system of the Tehuacan Valley.

KEYWORDS. Hydrogeochemical characterization, mixing, water-rock interaction, flow direction, WQI.

The present study is mostly developed in the southeast of the State of Puebla, México in the area known as the aquifer system of the Tehuacán Valley. The significant lithological heterogeneity in the area is highlighted, represented by the presence of the three main types of rocks: igneous, sedimentary, and metamorphic. Among the anthropogenic factors, the presence of urban areas and an irrigation district, as well as widely extended agricultural and livestock activities, stand out. A hydrogeochemical characterization was carried out based on the integration of information from 45 samples obtained from wells and springs, of which the major ions were analyzed: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} and NO_3^- as well as the physicochemical parameters: pH, Electrical Conductivity (CE), Total Dissolved Solids (TDS), Alkalinity, and Temperature. The results obtained indicate that the dominant water type in the study area is Na-Ca- HCO_3 -Cl, followed by Na-Ca-Mg-Cl, Ca-Na-Mg- HCO_3 , and Na-Mg-Ca-Cl, all of which are representative of mixing processes. The main hydrogeochemical processes found were water-rock interaction, mixing, ion exchange, reverse ion exchange, and in some samples, the evaporation process was notable. The principal mixing is found in the central zone of the study area, where flows from the northwest associated with the Tecamachalco Valley aquifer system and flows from the northeast related to the melting of the Pico de Orizaba and the impermeable highlands converge. Local, intermediate, and regional flows were found, with the predominance of the latter type of flow towards the southeast of the study area, which allowed associating the natural evolution in this direction. It was found that 87% of the samples exceed the Mexican Official Standard NOM-127-SSA1-2021 in at least one major ion or physicochemical parameter. Additionally, the water quality indices for human consumption, ICA, and ICON, were obtained, finding that the largest extent of the study area is classified as contaminated according to ICA and is of low contamination according to ICON. These indices also determined that the worst quality water is concentrated towards

the southeast of the study area, coinciding with the direction of evolution of the groundwater determined by the hydrogeochemical characterization.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La importancia del abastecimiento de agua subterránea para uso y consumo humano en zonas urbanas como principal fuente de abasto, hace vital la necesidad de conocer integralmente los diversos factores o condiciones que determinan su composición química y calidad, que puede estar asociada a las características geológicas del acuífero y a los procesos químicos que se desarrollan en él. Actualmente la caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del Valle de Tehuacán ha adquirido gran relevancia en la tarea de conocer a profundidad el comportamiento de los sistemas acuíferos, acercándose más al funcionamiento real, al integrar la información hidrogeoquímica con modelos conceptuales, y el análisis de flujo (Morán-Ramírez et al., 2018; Morán-Ramírez et al., 2020; Pérez-Martínez et al., 2021; Ramos-Leal et al., 2018).

En la zona de estudio, la caracterización hidrogeoquímica adquiere importancia debido a la complejidad geológica que presenta; así como, la influencia de la presencia de regiones áridas y semiáridas (INEGI, 2020), debido a que esta característica puede generar susceptibilidad para que se presenten fenómenos de escasez de recursos hídricos (Nsabimana & Li, 2023).

Por una parte, la geología influye en la presencia de procesos evolutivos que pueden ser estudiados tanto cuantitativa como cualitativamente (Ramos-Leal et al., 2018). Este aspecto contribuye en el surgimiento de fenómenos químicos que, a pesar de ser naturales, pueden modificar la calidad del agua.

Por otra parte, es un hecho que actualmente la problemática no está limitada únicamente a la escasez del recurso hídrico, los procesos naturales y las fuentes antropogénicas pueden contribuir al deterioro de la calidad de este recurso en una medida importante que requiere ser evaluada y reportada (Nsabimana & Li, 2023). Así el crecimiento de los asentamientos urbanos y de zonas industriales, también puede repercutir en el sistema generando efectos de tipo antrópico que pueden

resultar en afectaciones de la calidad del agua subterránea. Este fenómeno debe ser evaluado y diferenciado de las afectaciones de tipo natural.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar hidrogeoquímicamente el agua del sistema acuífero del Valle de Tehuacán para comprender los procesos químicos que ocurren y relacionarlos con la complejidad geológica de la región y las actividades antropogénicas que ahí se desarrollan.

1.2.2 Objetivos específicos

- Generar una base de datos hidrogeoquímicos de una parte de la zona de estudio, con información obtenida en campo.
- Desarrollar un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico en la zona de estudio.
- Entender la variación espacial de la composición química del agua subterránea en la zona de estudio.
- Identificar si existen interconexiones de agua subterránea de diferentes orígenes.
- Evaluar la influencia de la complejidad geológica sobre los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar en la zona de estudio.
- Identificar la afectación en la calidad del agua por actividades antropogénicas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Realizar una caracterización hidrogeoquímica permite conocer la composición química del agua; así como, reconocer los diversos procesos hidrogeoquímicos que la afectan desde su recarga hasta su descarga. Este conocimiento es clave para la evaluación de la calidad del agua y sirve como una pauta para conocer si el agua utilizada cumple con los estándares necesarios y es segura para los usos que se le dan. Esta información adquiere mayor relevancia en la zona de estudio, debido a que a pesar de que el agua subterránea es utilizada como un importante suministro

para distintos usos que van desde el consumo humano hasta el riego de cultivos, existen muy pocos estudios que tengan como objetivo la caracterización hidrogeoquímica.

Es importante reconocer que, si bien las actividades antropogénicas tienen repercusiones importantes en la composición química del agua subterránea, está también será alterada por otros factores naturales como el tipo de geología presente en el medio con el cual interactúa. Kumar et al. (2014) atribuye que la composición química del agua estará principalmente determinada por la reacción química entre el agua y las rocas o suelo a través de los cuales viaja. En la zona de estudio destaca la alta heterogeneidad litológica existente y resulta de gran relevancia identificar los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar debido a la interacción con distintos tipos de rocas, aprovechando que en el área en donde se realiza la caracterización, afloran los tres tipos principales de rocas; ígneas, sedimentarias y metamórficas.

1.4 HIPÓTESIS

La complejidad geológica de la zona de estudio, representada por la alta heterogeneidad litológica; así como, por la presencia de estructuras geológicas como fallas, fracturas, y plegamientos, son los factores que más influyen para que los principales procesos hidrogeoquímicos que ocurren en el agua subterránea del Valle de Tehuacán sean la mezcla y la interacción agua-roca.

1.5 ANTECEDENTES

En el marco de la necesidad de cumplir con el objetivo internacional de garantizar el acceso a agua limpia, debido a que se trata de un derecho humano (UNWATER & UNESCO, 2022), se han desarrollado investigaciones enfocadas en caracterizar hidrogeoquímicamente tanto el agua subterránea como superficial a nivel mundial. Además, se ha destacado la importancia que tiene el agua subterránea como un recurso esencial en zonas áridas y semiáridas (Mukherjee & Singh, 2022), climas representativos de la zona de estudio de la presente tesis.

De acuerdo con investigaciones realizadas en zonas con características climáticas similares a las que se presentan en el área de estudio, el proceso de interacción agua-roca destaca por ser un proceso dominante entre los que intervienen en otorgar al agua las distintas características químicas particulares, esto además, permite reforzar la idea de que la calidad de este recurso hídrico no está influenciada únicamente por actividades antropogénicas, sino que, también las características geológicas de los lugares por donde circule el agua serán un aspecto determinante en su composición (Jude et al., 2023).

Otro aspecto relevante desencadenado de la investigación en el campo de la hidrogeoquímica, es que hoy en día se asume que la composición y calidad del agua estará sumamente influenciada por la interacción entre el agua y el suelo, por factores como la composición del agua de recarga, el contacto con las rocas presentes en la zona no saturada, el tiempo de residencia y las reacciones fisicoquímicas dentro del acuífero (Appelo & Postma, 2004; Fetter, 1994; Jude et al., 2023).

En México los Complejos Metamórficos Oaxaqueño y Acatlán representan una historia y características geológicas muy particulares, por ello los diversos estudios existentes en la zona, están enfocados principalmente en la datación de las rocas presentes, y la inferencia de su evolución. Sin embargo, hay ausencia de investigaciones enfocadas en la hidrogeología de parte del lugar, y un avance nulo en cuanto a estudios de caracterización hidrogeoquímica del agua que circula por ciertas formaciones presentes en la zona de estudio. Por lo anterior, resulta de gran interés tener conocimiento de la composición del agua en esta área y conocer si ésta tiene la calidad adecuada para los usos a los se destina, dada la composición mineralógica del tipo de rocas que constituyen estos complejos y la importancia del proceso de interacción agua-roca que han demostrado estudios en zonas con características parecidas a nivel mundial, principalmente por el hecho de que en el área existen comunidades que dependen de este vital recurso.

En cuanto a la parte del área de estudio ubicada en y alrededor del Valle de Tehuacán, existen investigaciones enfocadas en hidrogeología e hidrogeoquímica

del agua tanto superficial como subterránea, algunos trabajos se muestran a continuación:

En 2019, la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM) utilizó la definición del área correspondiente al acuífero del Valle de Tehuacán que establece la CONAGUA (2020), e infirió que existe conexión hidrogeológica del acuífero mencionado con los acuíferos de Tecamachalco y de Cuicatlán. En este trabajo fue definido un modelo conceptual del Acuífero del Valle de Tehuacán, en donde resalta una sección geológica en la que se describen las permeabilidades asociadas con las formaciones que ahí se encuentran. También se interpreta la evolución de las curvas de nivel estático en los años 2011 a 2017. Y se resaltan los problemas de: escasez natural del agua, sobreexplotación, calidad del agua subterránea y costo por agotamiento. En cuanto a calidad del agua subterránea, destaca la mención del cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994 en la zona, aclarando como única excepción a los Sólidos Totales Disueltos (STD).

Otra investigación de interés en el área de estudio fue realizada en 2015, por Juárez-de la Cruz. Este trabajo fue aplicado tanto para aguas subterráneas como superficiales. Se determinaron índices de calidad enfocados en la evaluación de la calidad del agua para el uso agrícola. Se determinó la composición química del agua, parámetros fisicoquímicos y iones mayoritarios. Destacando el uso de boro, ortofosfatos, nitratos y silicio para el análisis del deterioro de la calidad del agua en la zona de estudio.

En 2011, Sandoval-Montes en su trabajo “Identificación de los Flujos Subterráneos que alimentan al Acuífero de Tehuacán en el Estado de Puebla, México con base en Indicadores Hidrogeoquímicos y la Temperatura del Agua Subterránea”, utilizó 46 datos de pozos proporcionados por el INEGI. El trabajo estuvo enfocado en la determinación de los flujos que llegan al acuífero del Valle de Tehuacán (que se encuentra dentro de la zona de estudio de esta tesis), siguiendo lo planteado por Tóth (1999) enfatizando en aspectos hidrogeoquímicos, geológicos y topográficos principalmente. Los resultados permitieron identificar las zonas de recarga y

descarga; así como, reconocer una diferenciación de los sistemas de flujo utilizando los diagramas hidrogeoquímicos Piper (1944) y Durov (1948).

López-López et al. (2019) determinó índices de calidad del agua (WQI) y comunidad de macroinvertebrados en arroyos de tierras secas: el caso de Tehuacán-Cuicatlán Reserva de la Biosfera (México) ante el cambio climático. El trabajo se desarrolló en la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán y la comparativa es principalmente entre los ríos Grande y Salado. Los resultados obtenidos son importantes ya que se realizaron a partir de parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos en la zona. Adicionalmente se generó un contexto general que permitió hacer una comparativa con los datos que se midieron en la zona, la cual coincide con el área estudiada en la presente tesis.

Sedeño-Díaz et al. (2022) analizó 24 qanats para evaluar la calidad del agua en el Acuífero del Valle de Tehuacán definido así por la CONAGUA (2020). Se utilizaron 24 parámetros fisicoquímicos para construir un WQI (Índice de Calidad del Agua) dividido en 5 clases. Además, este se interpretó junto con los índices de diferencia normalizados de vegetación y salinidad usando un diagrama ternario. Los resultados indican que el 12.5% de los qanats tiene muy buena calidad, el 25%, buena calidad y el resto (62.5%) moderada a inaceptable. Se presentan mapas que permiten visualizar de forma gráfica, hacia donde se encuentra la mejor y peor calidad del agua en la zona de estudio.

1.6 ÁREA DE ESTUDIO

La mayor parte de la zona de estudio se localiza en el sur del Estado de Puebla (87.06%) y abarca parcialmente el norte del Estado de Oaxaca (4.03%) y el oeste del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (8.91%) (Figura 1). Se ubica entre los meridianos 97°55'24" y 97°4'16.6" de longitud oeste y los paralelos 18°46'15.5" y 18°10'29.6" de latitud norte y comprende un área de 5905 km². Dentro del área se encuentran 57 municipios, de los cuales 37 pertenecen al Estado de Puebla, 3 al Estado de Oaxaca y 17 a Veracruz de Ignacio de la Llave (INEGI, 2022).

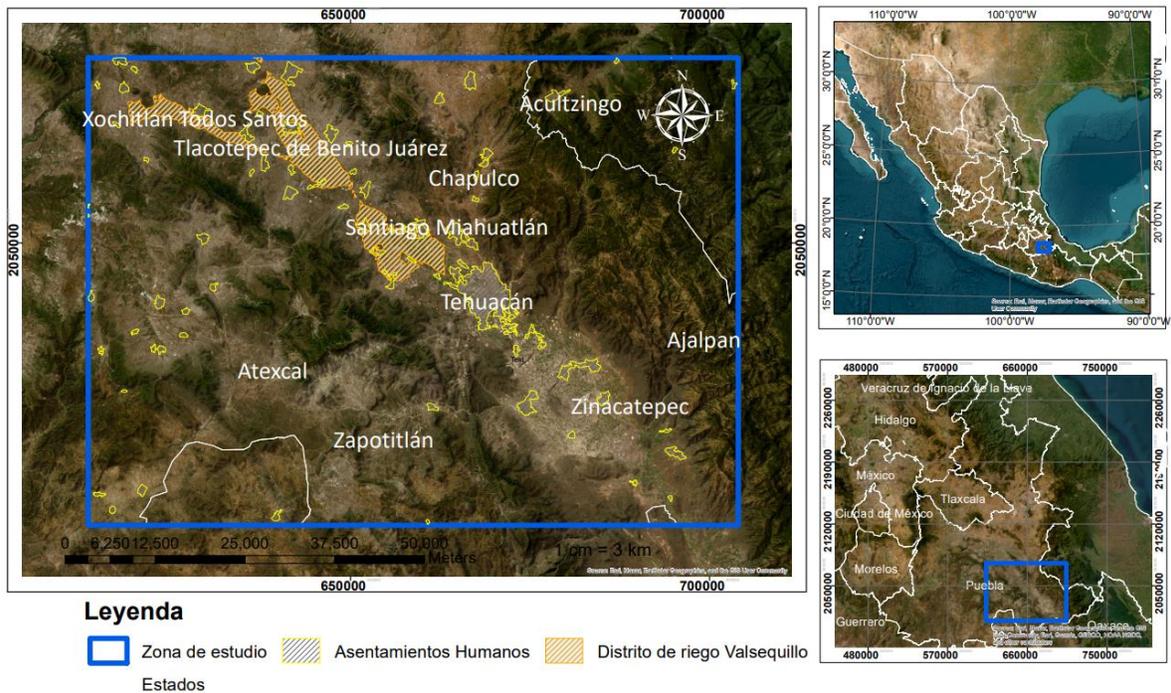


Figura1. Ubicación de la zona de estudio

1.7 CLIMA

De acuerdo con la clasificación de Köppen (1900), la mayor extensión del área de estudio presenta clima semiárido (Figura 2). En las sierras de cumbres tendidas que rodean la zona del valle con dirección noreste-sureste desde Huitziltepec hasta Coxcatlán, predomina el clima templado, que se vuelve más heterogéneo en cuanto a la subclasificación referente a humedad; hacia el este, dominando la clasificación templado-húmedo en la parte de la zona de estudio que pertenece al estado de Veracruz, y haciéndose más subhúmedo conforme se acerca al Valle de Tehuacán. Las zonas más cálidas se encuentran en los municipios localizados al sureste de Tehuacán, (Coxcatlán, Zinacantepec y Santiago Miahuatlán) al norte de Tepexi de Rodríguez y en Acatlán de Osorio (INEGI, 2020).

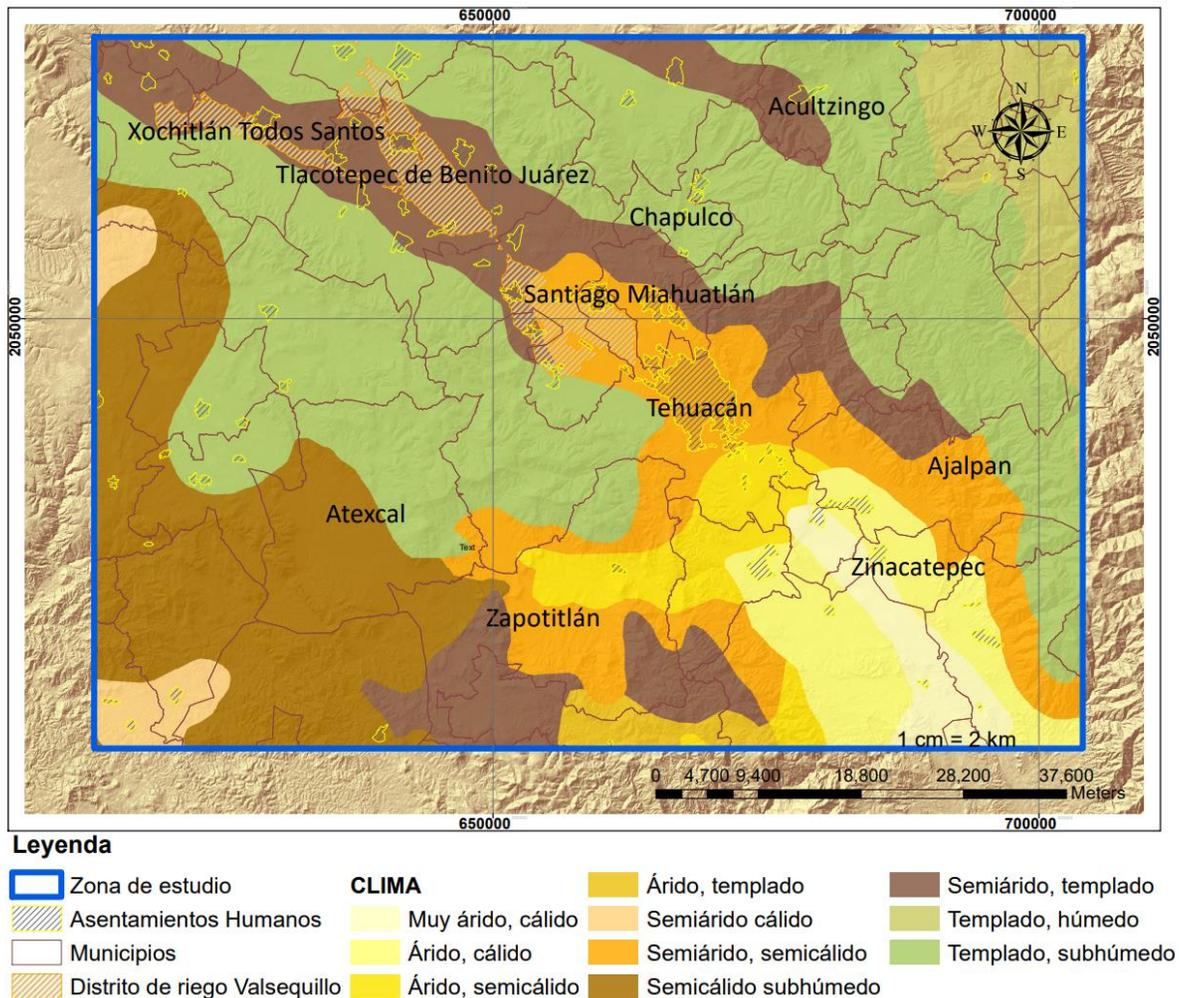


Figura 2. Clima, clasificación de Köppen para el área de estudio

1.8 FISIOGRAFÍA

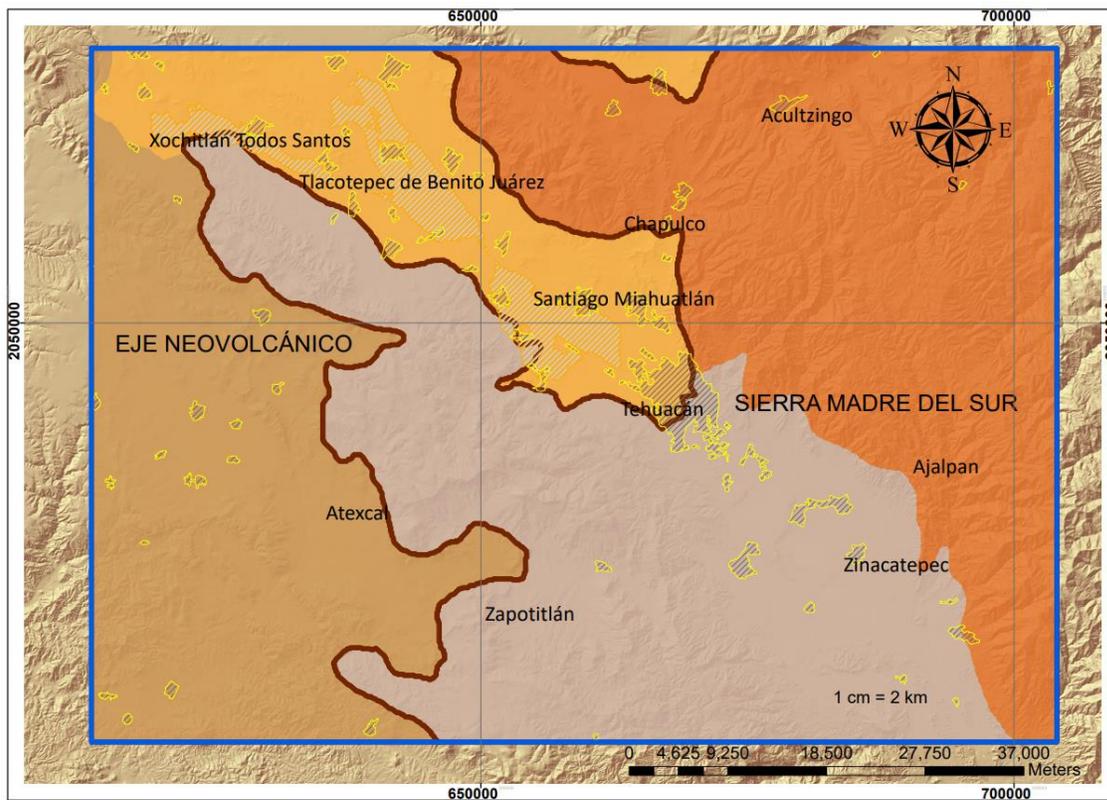
La mayor parte del área de estudio (64%) se encuentra en la Provincia Fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, mientras que la otra proporción (36%) corresponde al Eje Neovolcánico (Figura 3). El tipo de topoformas (Figura 4) que predomina en el área son las sierras rodeando el Valle de Tehuacán y la parte de llanuras en los municipios que rodean la región de Ixcaquixtla (INEGI, 2001).

1.9 VEGETACIÓN Y USO DE SUELO

El principal uso de suelo en la zona de estudio es para agricultura (37.47%), específicamente agricultura de temporal anual (Figura 5). Seguido se encuentran englobados como “otra vegetación”, distintos tipos de esta clasificación con

predominio de vegetación secundaria arbustiva de selva caducifolia. En tercer orden de predominio, destacan los matorrales (27.45%) presentes sobre todo en la parte central; además, se distribuyen pastizales y praderas. Los bosques se ubican hacia la parte del estado de Veracruz coincidiendo con la extensión que corresponde a climas templado húmedo y subhúmedo (INEGI, 2018).

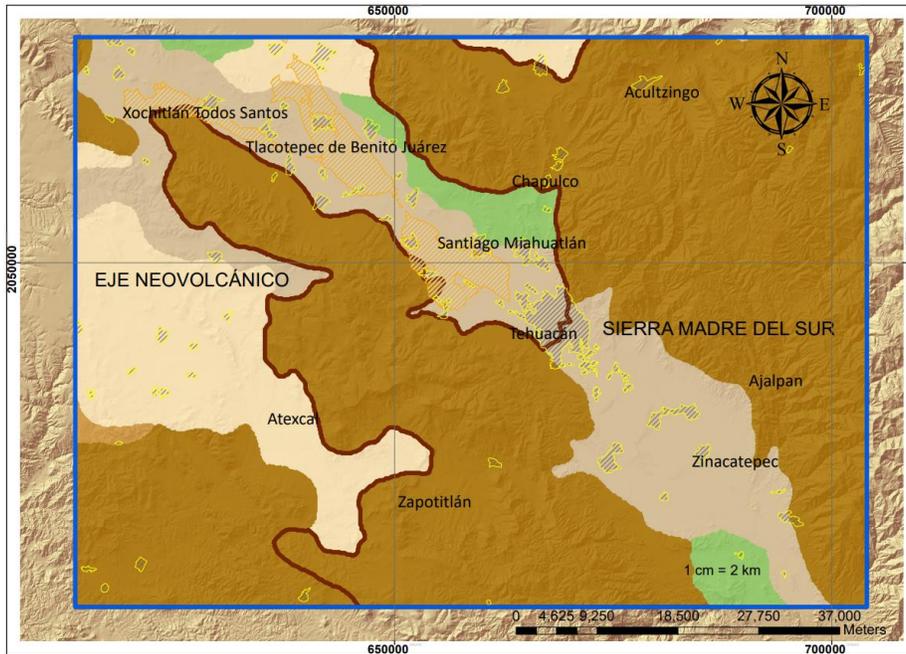
El asentamiento humano más extenso corresponde a la Ciudad de Tehuacán.



Legenda

- | | | |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Zona de estudio | PROVINCIAS FISIAGRÁFICAS | SIERRAS CENTRALES DE OAXACA |
| Municipios | SUBPROVINCIAS FISIAGRÁFICAS | SIERRAS DEL SUR DE PUEBLA |
| Asentamientos Humanos | LAGOS Y VOLCANES DE ANÁHUAC | SIERRAS ORIENTALES |
| Distrito de riego Valsequillo | | |

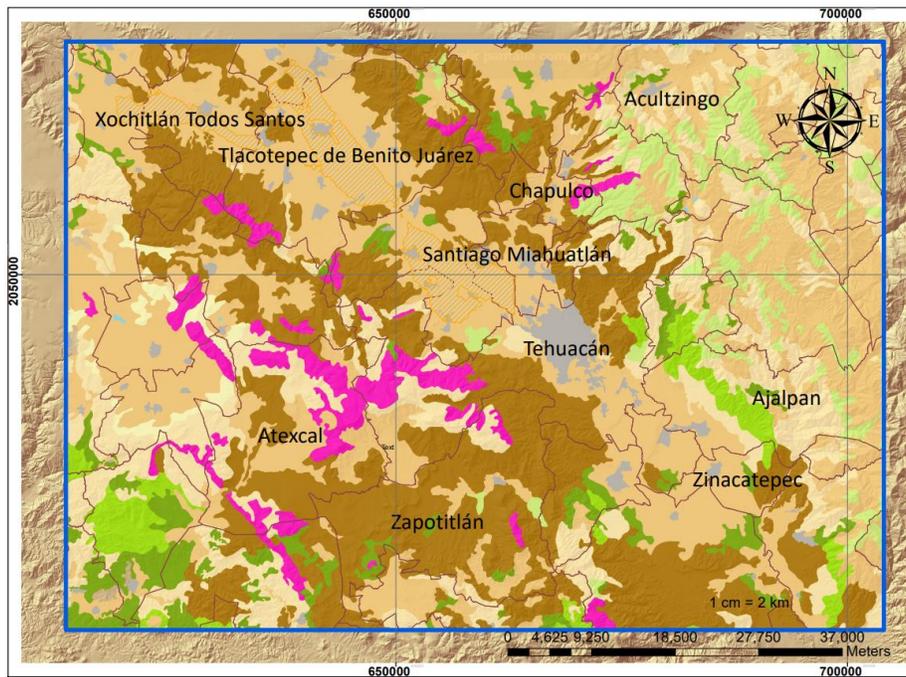
Figura 3. Provincias Fisiográficas en la zona de estudio



Leyenda

- | | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------|--------|
| Zona de estudio | Distrito de riego Valsequillo | TOPOFORMAS | Meseta |
| Asentamientos Humanos | PROVINCIAS FISIOGRAFICAS | Llanura | Sierra |
| | | Lomerío | Valle |

Figura 4. Topografías en la zona de estudio



Leyenda

- | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| Zona de estudio | AGRICULTURA | CUERPO DE AGUA | PALMAR |
| Distrito de riego Valsequillo | ASENTAMIENTOS HUMANOS | DESPROVISTO DE VEGETACIÓN | PASTIZAL |
| Municipios | BOSQUE | MATORRAL | SELVA |
| VEGETACIÓN Y USO DE SUELO | CHAPARRAL | OTRA VEGERACIÓN | SIN VEGETACIÓN |

Figura 5. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio

1.10 HIDROGRAFÍA

La mayor parte de la zona de estudio (56.87%), corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa del Golfo Centro y el resto del área pertenece a la Región del Balsas (CONAGUA, 2007) (Figura 6). En cuanto a la definición de Regiones Hidrológicas, la zona de estudio se encuentra entre las regiones denominadas Balsas y Papaloapan, y en las cuencas hidrológicas de los Ríos Atoyac y Papaloapan. Además, abarca 5 subcuencas hidrológicas.

Destacan los ríos Atoyac, Salado, Tilapa, Acatlán, Coyolapa, Alseseca, La Huertilla, El Chivo, Tizaác, Hondo, Tehuacán, Zapotitlán y como canales, El Dren de Valsequillo. (INEGI, 2006).

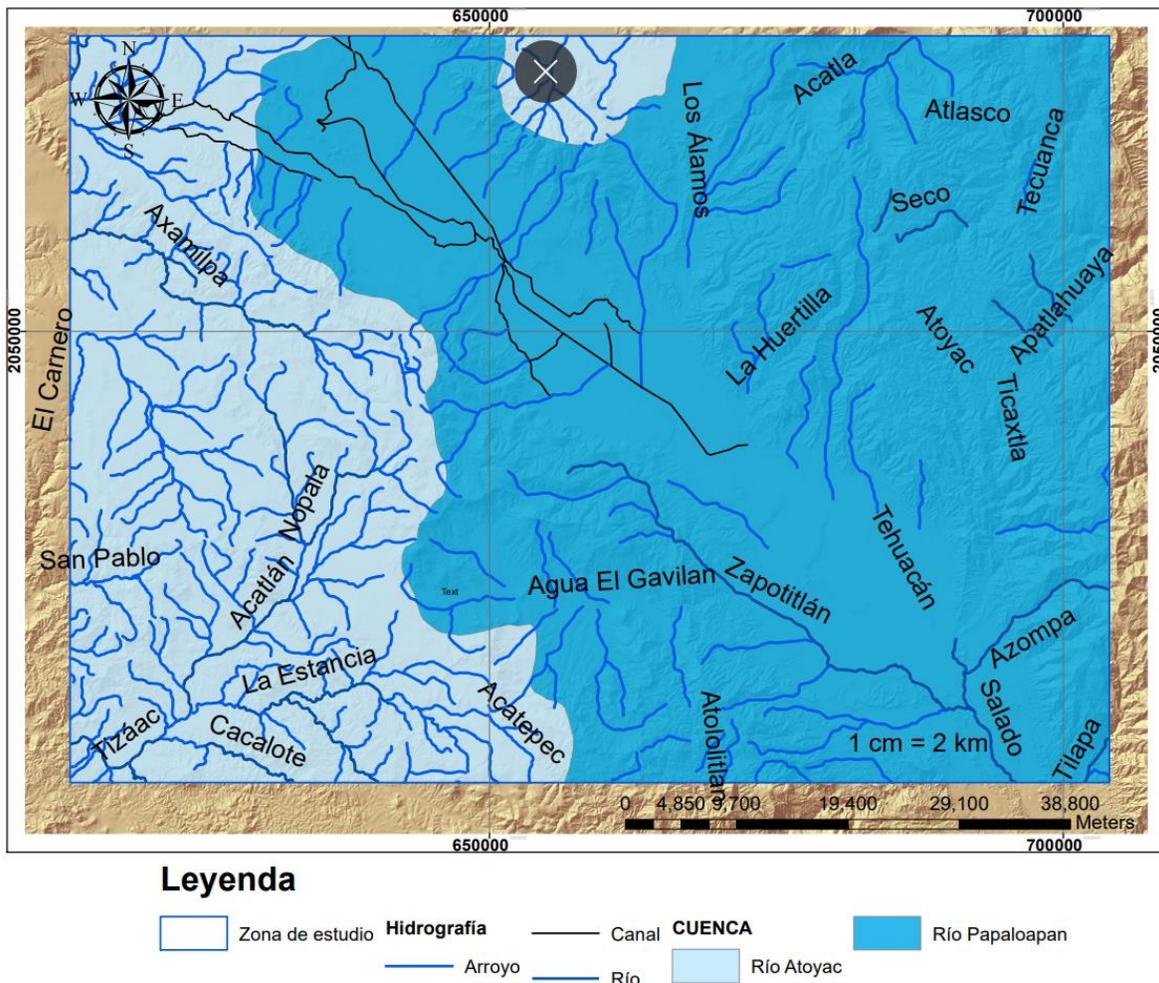


Figura 6. Hidrografía en la zona de estudio

CAPÍTULO II MARCO HIDROGEOLÓGICO

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se encuentra entre los terrenos tectonoestratigráficos Oaxaca, Mixteco y Maya (Campa & Coney, 1983). Las edades de las rocas van del Precámbrico hasta el Cuaternario. Las rocas más antiguas pertenecientes al Proterozoico corresponden a los basamentos e intrusivos ígneos de los terrenos. Los procesos geológicos que dominaron en la zona de estudio presentan diferencias de acuerdo con el terreno al que pertenecen. En los terrenos Mixteco y Oaxaqueño se presentan tanto rocas ígneas, como metamórficas y sedimentarias; mientras que, en el Terreno Maya, destacan las Formaciones Orizaba y Maltrata, constituidas por calizas (SGM, 2001).

El basamento cristalino del Terreno Mixteco corresponde al Complejo Acatlán. Encima se encuentran las formaciones jurásicas Tecomazuchil, Otlaltepec y Piedra Hueca. Hacia el centro-sur de la zona de estudio se depositó la Formación Matzitzí de edad Pérmico inferior. Del Cretácico destaca la Cuenca de Zapotitlán. En general, la evolución tectónica de la región no ha sido reconstruida hasta el momento (Mendoza-Rosales, 2010).

2.2 ESTRATIGRAFÍA

PALEOZOICO

ORDOVÍCICO

COMPLEJO ACATLÁN

Descripción geológica

El Complejo Acatlán constituye el basamento paleozoico del terreno Mixteco en la parte sur de México. Está formado por rocas metasedimentarias y metaígneas (metagabros, metabasitas, serpentinitas, cromititas y metagranitoides), que se presentan polideformadas y afectadas por diferentes grados de recristalización metamórfica, desde pizarras hasta migmatitas. Estructuralmente, se describen pliegues superpuestos y zonas de cizalla reactivadas como cabalgamientos,

también existen fallas normales o fallas laterales con dirección NE-SE. A pesar de los diversos estudios geológicos que se han realizado en esta zona, aún no existe información certera sobre el contexto en el que se formaron y evolucionaron las unidades que lo constituyen.

TRONCO DE TOTOLTEPEC

Descripción geológica

De edad Pérmica inferior, se define como compuesto por granito y granodiorita (SGM, 2017). Keppie et al. (2016), hacen una descripción muy detallada mencionando la composición específica por sectores, resultado de la presencia de gabros, hornblendas, rocas máficas y ultramáficas débilmente foliadas, además de diques de composición granitoide rica en cuarzo. La plagioclasa es el mineral predominante del Tronco de Totoltepec.

FORMACIÓN XAYACATLÁN

Descripción geológica

El SGM (1998), la define como de edad Neoproterozoico-Ordovícico inferior. De acuerdo con Talavera-Mendoza et al. (2005), contiene esquisto verde, gneis, cuarzo feldespático, horizontes lenticulares de serpentina y anfibolita.

GRANITO COSAHUICO

Descripción geológica

De edad Pérmica, este cuerpo granítico localizado en la parte centro-sur de la zona de estudio, separa por intrusión a los complejos Oaxaqueño y Mixteco (SGM, 2012).

CUARZO MONZONITA-DIORITA

Descripción geológica

El SGM (2011), menciona la presencia de pequeños cuerpos de composición cuarzo-monzonítica a diorítica intrusionando a las formaciones de los alrededores que constituyen la Sierra de Zongolica.

FORMACIÓN COSOLTEPEC

Descripción geológica

Forma una parte importante del complejo Acatlán. Ortega-Guerrero (1978), describe su constitución representada por rocas metasedimentarias y metabasálticas gabroicas ampliamente extendidas en el Complejo Acatlán.

DEVÓNICO

FORMACIÓN TECOMATE

Descripción geológica

El SGM (2018a), establece esta Formación como de edad Devónico superior-Pérmico inferior, perteneciente al Complejo Acatlán. Además, describe que se encuentra constituida por metaconglomerado, metacaliza y menormente por metaarenisca y metalutita. La descripción más detallada de Sedlock et al. (1993), establece que la Formación está conformada por rocas pelíticas y psamíticas, mármoles, conglomerados y rocas volcánicas de bajo grado, fuertemente deformadas, que son principalmente flujos máficos y tobas con unidades félsicas raras.

PÉRMICO

FORMACIÓN MATZITZI

Descripción geológica

Centeno-García et al. (2009), menciona que esta Formación es la primera unidad que superyace sobre los basamentos metamórficos (Complejo Acatlán y Oaxaqueño). Centeno-García et al. (2009), describe que la Formación Matzitzi está constituida por una secuencia clástica, compuesta en su mayoría por areniscas, las cuales varían de composición arcosa, sub cuarzoarenita a litarenita. En menor proporción se disponen estratos o paquetes de lutita, lodolita carbonosa, arenisca conglomerática y conglomerado. La Formación presenta una gran variedad de plantas fósiles. Destaca que hacia la parte basal de la Formación se presentan conglomerados gruesos dispuestos en estratos masivos, los cuales están formados

por fragmentos de origen metamórfico, procedentes principalmente del Complejo Oaxaqueño. Hernández-Láscares (2000), reportó 1,080 metros de espesor para la Formación Matzitzí.

MESOZOICO

JURÁSICO MEDIO

FORMACIÓN TECOMAZUCHIL

Descripción geológica

De edad Jurásico Medio, (SGM, 2012). Campos-Madrigal et al. (2013) describe esta Formación como una sucesión de conglomerado oligomítico, arenisca y limolita. Donde el conglomerado está constituido por rocas metamórficas e intercalado con sublitarenita y subarcosa. Hacia la parte superior la constitución cambia a limolita. Destaca que la granulometría se afina tanto hacia la parte superior como hacia el sur de la Formación, presentándose más gruesa hacia la base. Otro aspecto destacable es que son comunes los nódulos de óxidos de hierro. El espesor medido por Campos-Madrigal et al. (2013) varía de los 457 m a los 80 m.

GRUPO TECOCOYUNCA INDIFERENCIADO

Descripción geológica

El SGM (2006), menciona que esta Formación de edad Jurásico Medio es la unidad más antigua de la plataforma Morelos-Guerrero. Se encuentra conformada por arenisca y conglomerado de cuarzo y subyace de forma discordante a las capas rojas de la Formación Zicapa.

FORMACIÓN PIEDRA HUECA

Descripción geológica

Silva-Romo et al. (2018a), define esta Formación como una sucesión arcósica compuesta por intercalación de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas y lutitas. Donde describe el conglomerado como constituido principalmente por clastos de cuarzo policristalino, roca granítica deformada o no deformada, esquisto, arenisca, limolita y escasa roca ígnea intermedia y está

soportado en una matriz de arena fina y gruesa. Por otro lado, menciona que la arenisca está presente de grano medio a grueso y que presenta una composición cuarzo-feldespática con algunos niveles de grano fino en matriz limosa y moderadamente cementada por sílice, en capas de 90 a 350 cm de espesor. Ortega-Guerrero (1989) atribuye un espesor aproximado de 880 m.

FORMACIÓN OTLALTEPEC

Descripción geológica

De acuerdo con Ortega-Guerrero (1989), corresponde a una secuencia de arenisca, lutita y limolita. En donde la parte basal se constituye de hasta 10 cm de diámetro de areniscas de grano fino y medio, provenientes de la unidad Piedra Hueca, además de clastos de esquisto y provenientes del Tronco de Totoltepec. Describe también que parece muy similar a la unidad inferior, pero que se diferencia porque es menos arcillosa. En cuanto a la descripción de los granos, comenta que la selección es de buena a moderada y su redondez varía de angulosa a subredondeada. Además, la cementación es moderada y los granos se pueden desprender. Se ha descrito la presencia de plantas.

En cuanto al ambiente de depósito, los constituyentes de las areniscas presentes probablemente provienen de la erosión del Complejo Acatlán, la Formación Piedra Hueca y de algunos cuerpos volcánicos contemporáneos. Se estima un espesor aproximado de 1500 m (Ortega-Guerrero, 1989).

CRETÁCICO INFERIOR

COMPLEJO MILONÍTICO SIERRA DE JUÁREZ

Descripción geológica

Al sureste de la zona de estudio aflora un cinturón de milonitas, que Mendoza-Rosales (2010) atribuye a la Cuenca Cuicateca. Corresponde al límite de los terrenos Zapoteco y Cuicateco y es definido como Complejo Milonítico Sierra de Juárez (Sedlock et al., 1993). Espejo-Bautista et al. (2021), define las siguientes unidades litológicas: una unidad metamórfica gabroica anortosítica, una unidad

metagabroica similar a MORB, una secuencia supracrustal metamórfica que incluye anfibolitas y esquistos pelíticos, y por último una unidad de intrusiones metagraníticas. El Complejo Sierra de Juárez está compuesto de gneis migmatítico diorítico-tonalítico, gneis cuarzodiorítico con granate, lentes de mesosoma pelítico, pegmatitas y aplitas y lentes de anfibolita (Mendoza-Rosales, 2010). La milonitización del Complejo Sierra de Juárez (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) se infiere como la deformación más antigua en la zona.

FORMACIÓN ZAPOTITLÁN

Descripción geológica

Calderón-García (1956) la describe como una secuencia de lutitas calcáreas micáceas intercaladas con margas y con bancos de caliza con monopleuras y nerineas, los cuales cambian hacia el sur a calizas con paquiodontos y conglomerado grueso de esquisto y cuarzo con intercalaciones de arenisca y lutita. Tiene un espesor medido mínimo de 200 m en las cercanías de Xochiltepec; mientras que Barceló-Duarte (1978), reporta 742 m sobre el Río Zapotitlán y Hernández-Éstevez (1980) indica que el espesor varía de 200-600 m. Sin embargo, se infiere que debido al plegamiento la Formación podría superar los 1,000 m.

FORMACIÓN CHIVILLAS

Descripción geológica

Anteriormente dividida en Chivillas superior e inferior, dado el contenido de rocas ígneas volcánicas reconocidas únicamente en el miembro inferior (Toriz, 1983). En este trabajo se sigue la unificación propuesta por Mendoza-Rosales (2010), dada la identificación de este tipo de rocas en ambos miembros de la Formación.

Mendoza-Rosales et al. (2013) define que la Formación Chivillas “consiste en flujos de lava basálticos frecuentemente con estructura en almohadilla, intercalados con depósitos siliciclásticos en estratos delgados a medianos de grauvaca, lutita, caliza arcillosa y conglomerado, que forman una sucesión volcanosedimentaria muy gruesa cortada por diques de composición similar a los flujos de lava”. Además, sugieren la presencia de un basamento cristalino conformado por rocas

metamórficas y que las diferencias granulométricas que presentan las areniscas pueden significar diferentes fuentes de procedencia.

Mendoza-Rosales (2010), caracteriza geoquímicamente las rocas volcánicas de la Formación Chivillas como de una composición máfica a intermedia.

FORMACIÓN SAN JUAN RAYA

Descripción geológica

Mendoza-Rosales (2010), la define como una alternancia de conglomerados, areniscas, limolita, lutita y calizas boundstone, dispuestas en estratos delgados a gruesos, comúnmente bioturbados, además, resalta la abundante presencia de fósiles, corales y rudistas. Describe los conglomerados como clastos de cuarzo blanco subredondeados a redondeados, que pueden estar intercalados con clastos de caliza, dispuestos en estratos lenticulares. Con respecto a las areniscas, menciona que estas van de grano fino a grueso, presentándose a lo largo de la Formación en estratos más gruesos (0.60 a 1.60 m). Las lutitas son frecuentes, encontrándose en estratos medianos a muy gruesos, disturbadas y con abundantes fósiles. Calderón-García (1956) a su vez, estimó un espesor de 1200 m, pero Mendoza-Rosales (2010) agrega que este puede ser mayor debido a que la Formación se encuentra plegada, y erosionada hacia la cima.

FORMACIÓN AGUA DE CORDERO

Descripción geológica

Pertenece a una de las formaciones que constituyen la Cuenca Zapotitlán, que se atribuye como un registro de la etapa de transgresión marina en el sur de México durante el Jurásico-Cretácico (Serrano-Brañas et al., 2014). De edad Barremiano-Aptiano, consiste en una intercalación de conglomerados polimícticos y areniscas (SGM, 2018a). Mendoza-Rosales (2010), describe la secuencia y características de la Formación. A destacar, el conglomerado se presenta en estratos masivos irregulares, es texturalmente inmaduro, mal clasificado y los clastos son muy angulosos a subredondeados de esquisto verde, granito y cuarzo metamórfico. Además, existe una intercalación con estratos de brechas de clastos que proceden

del Complejo Acatlán (esquistos y cuarzo metamórfico con algunos clastos de caliza). Otro aspecto relevante es la presencia de capas intercaladas de arenisca de grano fino con matriz de mica y cuarzo.

Ortega-Guerrero (1989), estima un espesor de entre 2000 y 3000 metros, mientras que Barceló-Duarte (1978) sugiere que no rebasa los 1000 metros. Mendoza-Rosales (2010), describe el ambiente de formación como costero, incluyendo depósitos de abanico delta, de planicie costera, de tormenta, laguna, islas de barrera y biohermas.

FORMACIÓN MAGDALENA

Descripción geológica

De edad Aptiano. Sobreyace a la Formación Jurásica denominada Piedra Hueca. De acuerdo con el SGM (2018a), básicamente consiste en una intercalación de arenisca, marga y lutita. En la Formación se encuentra también conglomerado polimíctico.

FORMACIÓN ORIZABA

Descripción geológica

De edad Albiano-Cenomaniano. El SGM (2019), describe que esta Formación consiste en el depósito de un grueso paquete de caliza, caliza dolomitizada y dolomía. También menciona la presencia de ciertos niveles de brecha calcárea. Esta Formación resulta de las condiciones favorables para el desarrollo de carbonatos de plataforma a partir del Albiano.

FORMACIÓN MORELOS

Descripción geológica

De edad Cenomaniano-Albiano (SGM, 2006). Fries (1960), describe esta Formación como una secuencia de calizas y dolomías dispuestas en capas interestratificadas, además se menciona contenido de pedernal en forma de nódulos, lentes y fragmentos de fósiles silicificados. Destaca la descripción sobre el contenido de

material arcilloso, que se encuentra presente en pequeñas cantidades. Además, no se identificaron interestratos de lutitas. Según la proporción de carbonatos encontrada en la Formación, se infiere que la roca de la que está compuesta se puede considerar relativamente pura. Se identificó materia bituminosa.

FORMACIÓN MIAHUATEPEC

Descripción geológica

Mendoza-Rosales (2010), describe esta Formación como constituida por calizas en sus variaciones wackestone, packstone y grainstone. Estas calizas se encuentran dispuestas en estratos tabulares delgados con bandas de pedernal que desaparecen hacia la parte superior. Además, se incluyen conglomerados intraformacionales. Calderón-García (1956), reporta un espesor aproximado de 900 m.

FORMACIÓN COYOTEPEC

Descripción geológica

Ortega-Guerrero (1989), describe una sucesión del Cretácico Inferior de calizas biomicríticas parcialmente dolomitizadas que denomina Caliza Coyotepec.

Se definieron tres miembros principales (inferior, medio y superior). El miembro inferior tiene como principal característica, que se encuentra formado por biomicrita, nódulos y lentes de pedernal. El miembro medio está constituido por biomicrita, biointramicritas y biomicruditas. Presenta horizontes completamente dolomitizados, horizontes de brecha intraformacional y de coquina. El miembro superior está compuesto por biomicrita y biomicrudita, en ocasiones se presentan brechadas y fracturadas con rellenos de calcita, con intercalaciones de horizontes arcillosos. La cima se encuentra cubierta por caliche.

Se midió un espesor de 400 metros en el Río Magdalena, el cual puede incrementarse pues no aflora en la parte superior (Ramos-Leal, 1989).

CRETÁCICO SUPERIOR

FORMACIÓN MALTRATA

Descripción geológica

De edad Turoniano, el SGM (2011) la describe como una secuencia de caliza, lutita, arenisca y calcarenita, dispuesta en estratos medios, y que además presenta bandas, lentes y nódulos de pedernal. Martínez-Tenorio (2021), describe que el incremento del nivel del mar continuó, llegando a una gran inundación que propició el desarrollo de un ambiente de aguas profundas de baja circulación, llegando así a la depositación de la Formación Maltrata, que detalla consiste en una secuencia de calizas de textura mudstone y wackestone alternadas con sedimentos arcillosos.

FORMACIÓN MEZCALA

Descripción geológica

De edad Cretácico superior (SGM, 2001). Esta Formación se caracteriza por estar constituida de margas, calizas y lutitas. Las calizas en la Formación se encuentran plegadas (Salcedo-Sánchez et al., 2013).

FORMACIÓN GUZMANTLA

Descripción geológica

De acuerdo con el SGM (2019), la Formación se caracteriza por estar constituida de caliza, caliza con lentes y nódulos de pedernal de color blanco a gris, además de presentar interestratificaciones de lutita calcárea y dolomía. Martínez-Tenorio (2021), menciona que la Formación incluye dos secuencias, la inferior presenta una secuencia de calizas de textura mudstone y wackestone con intercalaciones arcillosas, bioclastos y foraminíferos planctónicos y la superior comprende calizas de textura packstone y grainstone de ooides. Además, destaca la presencia de evidencias de karsticidad, como microcavidades y fracturas rellenas con limo vadoso.

FORMACIÓN MÉNDEZ

Descripción geológica

De edad Cretácico superior (Campaniano-Mastrichtiano), suprayace a la Formación Guzmantla. Corresponde a una secuencia de lutita, con alternancias de lutita y arenisca y en menor proporción lutita calcárea (SGM, 2019). Su espesor varía entre los 270 y 500 metros.

CENOZOICO

TERCIARIO

FORMACIÓN COATZINGO

Descripción geológica

De edad Eoceno-Oligoceno, Beraldi-Campesi et al. (2006), “interpretan la evolución sedimentaria como la retrogradación de un sistema aluvial, seguida de la expansión progresiva de un sistema lacustre alcalino, con ambientes deltaicos, palustres y evaporíticos y en el análisis realizado, sugieren un cambio hacia condiciones más áridas con el tiempo”. Se han distinguido dos unidades en la Formación. La primera denominada Unidad Pie de Vaca inferior, consiste principalmente de caliza, pedernal y caliza arenosa, y la inferior llamada Unidad Ahuehuetes está compuesta principalmente por tobas y areniscas tobáceas.

FORMACIÓN BALSAS

Descripción geológica

De edad Paleoceno-Eoceno, el SGM (2006) menciona que esta Formación se encuentra cubriendo a las formaciones de la Cuenca Zapotitlán (específicamente a la Miahuatepec). Consiste en conglomerado polimíctico, arenisca y limolita.

FORMACIÓN TEHUACÁN

Descripción geológica

De edad terciaria (SGM, 2001). Es el relleno principal del Valle de Tehuacán. Dávalos-Álvarez et al. (2007) describe la Formación ampliamente, mencionando la

composición de sus partes inferior y medias constituidas por caliza lacustre, arenisca y limolita, con lutita amarilla y lodolita verde intercaladas, presentando distintos grados de disolución, recristalización y silicificación. En la parte superior se atribuye lodolita verde y yeso fibroso con intercalación de horizontes tobáceos, además se menciona que es común encontrar desecación. Destaca la descripción de la toba, cuyo grado de compactación es variable, es densa y presenta huecos producto de la alteración de minerales, su textura es porfídica y contiene fenocristales de biotita y líticos de una roca silícica, en las capas debajo de la toba hay enriquecimiento en sílice, de apariencia pedernal. Barrientos-Reyna (1985); interpretó el ambiente como lacustre. Además, características como presencia de sílice bajo la toba, laminación y agrupación de capas, así como la orientación de sus caras, infieren un depósito subacuoso. Se estimó un espesor mínimo de 300 m (Dávalos-Álvarez et al., 2007).

FORMACIÓN HUAJUAPAN

Descripción geológica

De edad Oligoceno (SGM, 2012). La Formación Huajuapan está compuesta por conglomerados, areniscas y algunas tobas andesíticas, los conglomerados que la conforman tienen un color rojizo a morado y se encuentran en una matriz con cementante calcáreo. En cuanto a la extensión, comprende un espesor de entre 900 y 1000 metros. Para el origen de las rocas sedimentarias de esta Formación, se atribuye que son de tipo continental y que, por sus características litológicas, podrían corresponder a sedimentos de depósitos lacustres.

ANDESITA DEL OLIGOCENO

Descripción geológica

Ubicada entre los municipios de San Jerónimo Xayacatlán y Totoltepec de Guerrero. El SGM (2018a), describe que las andesitas presentes en esta zona son de textura afanítica y estructura compacta fluidal, y que están constituidas por plagioclasa, olivino y magnetita, además presentan silicificación.

FORMACIÓN COAYUCA

Descripción geológica

Fries (1966), describió que la Formación Coayuca está compuesta por tres miembros. El primero es de composición siliciclástica, el segundo se caracteriza por estar constituido de calizas, sílex y margas y el tercero es mayoritariamente yesífero. Entre los dos primeros miembros se alcanza un espesor de 300 m y el tercer miembro comprende 200 m. En cuanto al ambiente de depósito, se infiere como de cuenca lacustre poco profunda.

BASALTO DEL PLEISTOCENO

Descripción geológica

De edad Pleistoceno, en su mayoría se encuentra distribuido como derrames de basalto-piroclasto en la parte norte de la zona de estudio. La influencia del Eje Neovolcánico, provincia fisiográfica sobre la que se encuentra una parte importante de la zona de estudio (INEGI, 2001), se refleja en la presencia de lava de composición basáltica, asociada con conos cineríticos monogenéticos como el Popocatepetl.

CUATERNARIO

TOBA ANDESÍTICA DEL PLEISTOCENO

Descripción geológica

Esta parte de la zona de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, en donde la presencia de piroclastos de composición andesítica relleno los valles presentes en el área es muy representativa. Las tobas arenosas de composición andesítica presentes en el área se describen como pobremente consolidadas, además para el mismo periodo y ubicación la CONAGUA (2020), reporta la presencia de arenas tobáceas, arenas y gravas; así como de depósitos de pie de monte, aluviales y fluviales.

GRAVA-ARENA DEL PLEISTOCENO

Descripción geológica

De edad Pleistoceno, están expuestos como depósitos de piedemonte.

CONGLOMERADO POLIMÍCTICO-ARENA DEL PLEISTOCENO

Descripción geológica

Se trata de conglomerado mal clasificado de edad Pleistoceno, que se encuentra dispuesto caóticamente e incluido en una matriz arcillosa. Se describe como un depósito de piedemonte semiconsolidado. Presenta estructura masiva y textura clástica, distribuido en capas de un espesor de 80 cm. Además, se menciona la presencia de lentes pequeños de travertino (SGM, 2018a).

DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES DEL HOLOCENO

Descripción geológica

Se describe como producto de la erosión de rocas preexistentes en la zona (SGM, 2018b).

2.3 HIDROGEOLOGÍA

En la parte superior de la zona estudiada se puede describir un acuífero libre conformado por tobas de composición andesítica poco consolidadas. Los registros del nivel piezométrico y la profundidad de los pozos permiten inferir que esta podría considerarse una zona de recarga para el flujo que sigue hacia las localidades ubicadas al SE (municipios de Tehuacán, Ajalpan y San José Miahuatlán). En la parte NE, en donde también se tienen datos hidrogeoquímicos, la parte constituida por tobas se infiere de igual manera como un acuífero libre rodeado por altos topográficos formados por las calizas de la Formación Maltrata, caracterizada como impermeable en la presente tesis.

Hacia el SE, en donde la litología presente es la de la Formación Tehuacán, la heterogeneidad litológica se ve reflejada en la presencia de manantiales como resultado de interacciones entre unidades permeables e impermeables. Sin

embargo, dados los datos proveídos de piezometría y de acuerdo con lo informado por CONAGUA (2020), se asume un acuífero libre, heterogéneo y anisotrópico.

La dirección general del flujo está marcada de NW a SE; sin embargo, hacia la parte central de la zona, en la intersección del cambio litológico entre las tobas cuaternarias y la Formación Tehuacán, llega un flujo proveniente del NE, el cual se puede asumir que proviene del deshielo del Pico de Orizaba y de la entrada de recarga procedente de los altos topográficos en donde se ubican las calizas de la Formación Maltrata. Por otro lado, los flujos de la parte NW también provienen del norte, en este caso del Valle de Tecamachalco. La lejanía a fuentes de recarga permite inferir que corresponden a flujos regionales.

Cabe hacer mención que los pozos de aprovechamiento se ubican en los acuíferos libres estudiados de la zona. En resumen, se tiene que regionalmente la dirección del flujo es NW-SE. Con recarga proveniente del deshielo del Pico de Orizaba sobre todo en la parte del NE, así como entradas de flujo de retorno de riego, destacando el Distrito de Riego Valsequillo (CONAGUA, 2020), cuya ubicación se puede observar en la Figura 8.

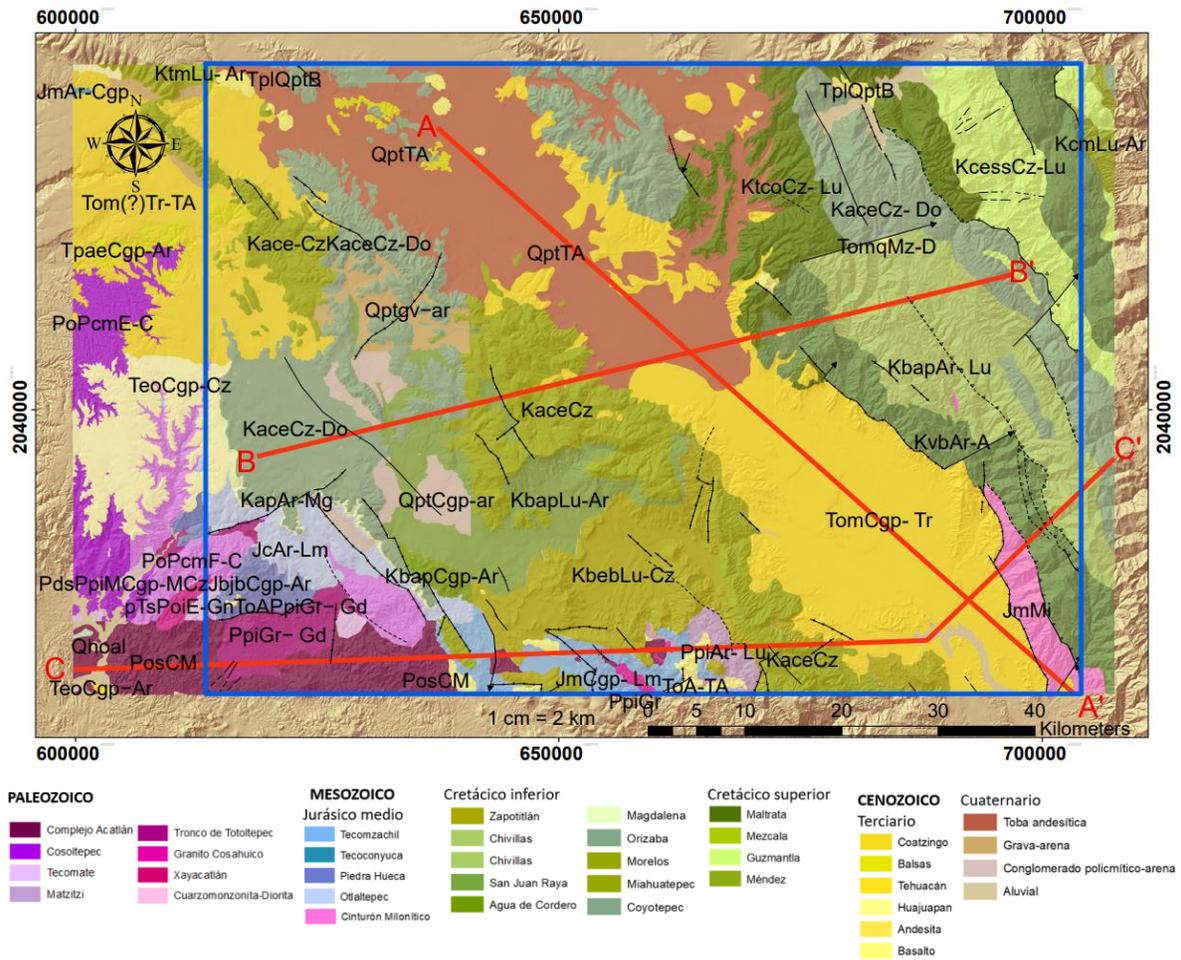


Figura 7. Mapa geológico y estructural de la zona de estudio

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL INICIAL

Para la realización de este modelo se recopiló información geológica, con el objetivo de definir las zonas que corresponden a los acuíferos del área de estudio con base en sus características, atribuyendo condiciones favorables para formar este tipo de estructuras; así como, una primera conceptualización de zonas de recarga y descarga. Para este fin se generó un mapa litológico y estructural de la zona a partir de datos del Servicio Geológico Mexicano, con las cartas a escala regional: Orizaba E-6 1:2500000 (2001), y a escala local 1:150000 E-B63 (2006), E-B64 (2006), E-B73 (2018b) y E-B74 (2018a).

Posteriormente se evaluó cada una de las formaciones presentes en la zona, identificando unidades con alta, buena, media, baja permeabilidad e impermeables con base en información reportada en trabajos enfocados en el estudio geológico de la zona.

Adicionalmente se realizaron tres secciones estratigráficas que permitieron conceptualizar un modelo a profundidad, distinguiendo el nivel potencial de permeabilidad, de acuerdo con la evaluación realizada previamente. Además de acuerdo con los datos topográficos (INEGI, 2020) y piezométricos (Conjuntos vectorial de aguas subterráneas, Tehuacán y Tecamachalco, INEGI, 2010) se estableció una primera conceptualización de las zonas de recarga y descarga.

3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS HIDROGEOQUÍMICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.2.1. Datos abiertos

Se utilizó una base de 36 datos del INEGI (2010a), que corresponde principalmente a la zona del Valle de Tehuacán atravesando los municipios de Yehualtepec, Cañada Morelos, Tepanco de López, Tehuacán, Chapulco, Santiago Miahuatlán, Altepexi, Ajalpan, Zinacatepec, San José Miahuatlán y Coxcatlán. También se incorporó parte de la base de datos del INEGI (2010b), (Conjuntos vectoriales de

aguas subterráneas. Zona hidrogeológica Valle de Tecamachalco. Escala 1:250 000, edición 2010), correspondiente a 2 puntos que se localizan en los municipios de Xochitlán Todos Santos y Molcaxac. Por lo tanto, se unificó una base de 38 muestras que se visualizan en la Figura 8.

3.2.2. Datos muestreados

La zona occidental del área estudiada no cuenta con datos abiertos sobre hidrogeología (referentes a piezometría) e hidrogeoquímica. Además, se consideró importante tener información de manantiales ubicados en la zona del Valle de Tehuacán, ya que la base de datos abiertos proveída por INEGI (2010a), únicamente considera pozos, y resulta importante hacer una comparativa entre lo que sucede en estos dos tipos de aprovechamientos. Lo anterior debido a que estudios como Al-Barwary et al. (2018) han reportado diferencias en las concentraciones de parámetros fisicoquímicos entre pozos y manantiales muestreados y otros no distinguen grandes variaciones.

El muestreo se realizó del 11 al 14 agosto del 2022. Como dato importante, se registró durante días de precipitación. Los datos medidos in situ fueron los correspondientes a pH, Demanda de oxígeno, Potencial Redox (ORP), Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (STD), Alcalinidad y Temperaturas ambiental y de las muestras de agua in situ. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de geoquímica de agua de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla; para la determinación de los datos de iones mayoritarios y elementos traza.

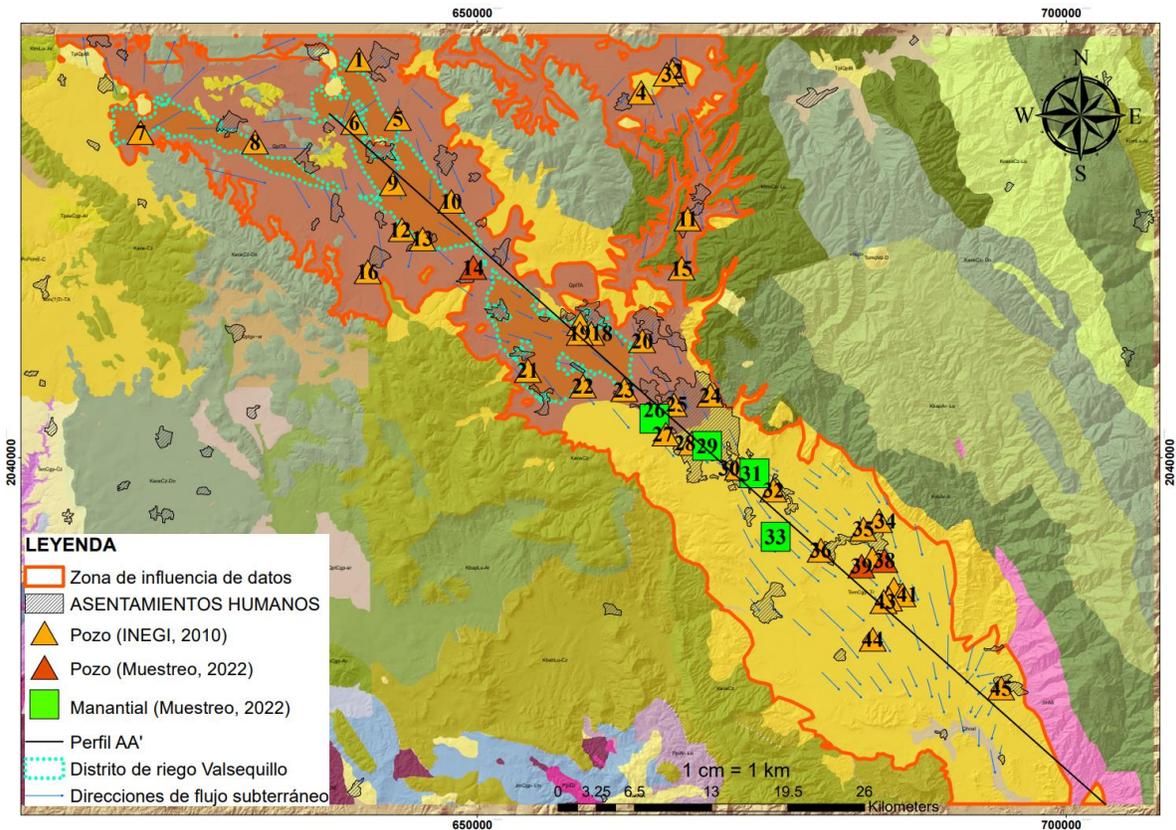


Figura 8. Ubicación de las muestras

3.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

3.3.1. Balance iónico

El primer tratamiento para el procesamiento de la información fue realizar un balance iónico para determinar la fiabilidad de los datos de iones mayoritarios a trabajar. El balance fue realizado para todas las muestras mediante la siguiente expresión:

$$\text{Error de balance iónico} = \frac{\text{Suma de cationes} - \text{Suma de aniones}}{\text{Suma de cationes} + \text{Suma de aniones}} \times 100$$

Rashid et al. (2020) atribuye que las muestras con un error menor al +/- 5% son útiles, mientras que las que superan este valor se consideran de calidad pobre. Sin embargo, Kartz (1989) considera que un error menor al +/- 10% es aceptable. Las desviaciones de los datos encontradas para el presente trabajo no resultaron

superiores al 10% en ninguno de los casos, por lo que no fue necesario revisar los métodos de muestreo ni los procedimientos analíticos.

3.3.2. Elaboración de mapas de distribución de parámetros y diagramas hidrogeoquímicos

Para el proceso de caracterización se realizaron diagramas hidrogeoquímicos (Lloyd & Heathcote, 1985), ya que son útiles en el objetivo de visualizar adecuadamente los datos, para proceder a analizar esta información y realizar la identificación de los procesos hidrogeoquímicos y de las familias de agua presentes en la zona estudiada. Además, complementar este tipo de diagramas con mapas generados con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite realizar análisis cada vez más integrales, donde también se involucran ventajas referentes a la disponibilidad de tener siempre al alcance la visualización de la ubicación, geología, topografía; así como, de otros temas de importancia en la interpretación de los datos, como el uso de suelo e identificación de actividades antropogénicas que se desarrollan en y cerca de los puntos muestreados.

Estos mapas de distribución permiten identificar la dirección de flujo y de acuerdo con lo descrito por Tóth (1999), la evolución tenderá hacia donde las concentraciones de los iones y parámetros son más altas. Además, en caso de que existan zonas anómalas o bien que de acuerdo con la interpretación integral con otros diagramas hidrogeoquímicos como Mifflin (1968), no correspondan con flujos muy evolucionados, se podrán asociar causas de origen geológico o bien antrópico dadas las características que rodean a la muestra estudiada.

3.3.2.1 Mapas de distribución de parámetros

Para tener una idea de la distribución de los parámetros químicos y fisicoquímicos en la zona de estudio se procedió a aplicar el método de interpolación “Ponderación de distancia inversa” (IDW por sus siglas en inglés) a la base de datos, permitiendo visualizar mapas temáticos de: iones mayoritarios, conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos y temperatura.

El resultado fue obtener una idea de la variabilidad espacial de los elementos medidos, lo cual se puede relacionar con el modelo conceptual y con las actividades

antropogénicas que ahí se desarrollan, permitiendo lograr tener una visión del porqué de las concentraciones y de una aproximación al reconocimiento del origen, de si este se trata de contaminación natural debido a las características intrínsecas (geología) de la zona o bien a aportes derivados de las diversas actividades humanas que ahí se desarrollan y siguen la dirección de flujo subterráneo llegando a producir una contaminación en los puntos muestreados.

Cabe destacar que la interpolación se consideró únicamente dentro de un área denominada “Zona de influencia” (Figura 8). El criterio para la delimitación de esta zona estuvo basado principalmente en los aspectos de (1) topografía: delimitando una zona de bajos topográficos localizados entre los parteaguas (altos topográficos) característicos de las provincias fisiográficas Sierra Madre del Sur y Eje Neovolcánico (INEGI, 2001), debido a que se considera que, a partir de estos, las características cambiarán en gran medida. Esta idea queda reforzada con la interpretación de los niveles piezométricos proporcionados por el INEGI (2010) que, permitieron definir la dirección de flujo e inferir la alta influencia que tiene la topografía en el flujo subterráneo. (2) Geología: el reconocimiento de la alta heterogeneidad presente en la zona de estudio, demostrada en los mapas de planta y las secciones geológicas a profundidad realizadas; así como, el mapa de permeabilidad presentado en esta tesis, permiten distinguir que hay formaciones geológicas impermeables, por lo tanto, no es posible considerar una interpolación de datos hasta esos puntos.

El método de interpolación adoptado es el IDW, y se desarrolló en el SIG ArcMap. En el presente trabajo se eligió dadas las referencias de resultados favorables en artículos publicados que utilizan este método específicamente para trabajos en el área de la hidrogeoquímica. Moharir et al. (2019), resalta que este método se basa en una naturaleza determinista que trabaja generando predicciones, además Charizopoulos et al. (2018), enfatiza en el atributo de que este método toma en cuenta la distancia a las ubicaciones de puntos sin datos para asignar valores similares de acuerdo con la cercanía entre los datos medidos. Estas ventajas se

pueden conceptualizar desde la fórmula matemática (Shepard, 1968) que se utiliza para la aplicación del método:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{W_i}$$

$$W = \frac{1}{d_i^p}$$

Donde: Z es el valor interpolado, Z_i es el valor conocido, n es número total de valores conocidos utilizados en la interpolación, d_i^p es la distancia entre los valores conocidos y los interpolados, y p es el parámetro de potencia donde el peso disminuye a medida que aumenta la distancia a partir de los valores interpolados. Este método también se resalta en Singh et al. (2013), donde se utiliza para la evaluación de la calidad del agua y para el mismo objetivo de la presente tesis.

3.3.2.2 Diagramas hidrogeoquímicos

Diagrama de Piper

El diagrama de Piper (1944), es una representación trilineal utilizada universalmente en donde los datos de iones mayoritarios se grafican en dos triángulos base, que posteriormente se proyectan en un diamante en la parte superior, en el cual se puede determinar la familia de agua a la que pertenece cada muestra; así como, los procesos hidrogeoquímicos relacionados. La concentración de potasio es usualmente mucho menor que la del sodio, por eso se agrupa. El agua se trata únicamente como si tuviera 3 aniones y 3 cationes (Piper, 1944).

Dentro de las importantes ventajas que ofrece este diagrama se encuentran: la versatilidad que proporciona para la fácil identificación de las familias, la capacidad de permitir representar la totalidad de las muestras y la existencia de software especializado que facilita herramientas de diseño como adecuar distintos colores y formas para generar una visualización óptima de la información de acuerdo con las necesidades que se tengan.

Mediante la evaluación del diagrama de Piper se procedió a analizar estas familias de agua en un mapa SIG con el objetivo de entender las relaciones entre los

distintos tipos de agua resultantes, con la geología y las actividades antropogénicas que se desarrollan en el área, comparando con otros estudios de sitios con características similares y entendiendo el porqué de los tipos de agua presentes y la lógica de esta información de acuerdo con lo reportado en otras publicaciones.

Diagrama de Mifflin

El diagrama de Mifflin (1968) permite identificar los tipos de flujo a partir de relaciones entre la concentración de la suma de cloruros y sulfatos en el eje **x** y de la suma de sodio y potasio en el eje **y**. La base de esta estructura establece que el aumento de estos iones se relaciona con la caracterización de flujos con tendencia a ser más regionales. En flujos locales dependientes principalmente de la precipitación, la cantidad de cloruros y sulfatos tiende a ser baja y existe un predominio de bicarbonatos. Así mismo, este diagrama fue modificado por Morán-Ramírez et al. (2022), en ambientes sedimentarios (calcáreos) como el estudiado, el predominio de calcio se mantendrá, al no existir una evolución del flujo en que tengan lugar procesos como intercambio iónico que se pueden ligar a un aumento de Na^+ y K^+ .

Diagrama de Gibbs

Construido en principio para el análisis de agua superficial de una base de datos muy extensa (He et al., 2019). Gibbs (1970) determina que, a nivel global, los principales procesos que controlan la química del agua superficial son: la precipitación atmosférica, el dominio de roca y el proceso de evaporación-cristalización. También resalta la consideración de contenido predominante de Ca^{2+} para aguas “frescas” y del dominio de Na^+ en cuerpos salinos. Los procesos de evaporación comúnmente van acompañados de un aumento de la salinidad, de hecho, el caso del estudio que propició la creación de este diagrama permite observar cómo este proceso va relacionado con el incremento de los valores de salinidad, representados por las concentraciones de STD, y la precipitación de calcita de una solución, la cual incrementa la relación de proporción de Na^+ a Ca^{2+} .

A pesar del origen de su desarrollo, este diagrama también se aplica en estudios de aguas subterráneas. Hay varios ejemplos de trabajos en los que este método ha

dado buenos resultados (Amrani et al., 2022; He et al., 2019; Kumar et al., 2008; Rao et al., 2022; Wu et al., 2021). La bibliografía y los resultados obtenidos en este trabajo de tesis permiten determinar acertado y recomendable el uso de este diagrama para la evaluación de procesos hidrogeoquímicos en aguas subterráneas.

Diagramas Bivariados

La selección de las relaciones a representar mediante diagramas bivariados estuvo basada en una amplia revisión de bibliografía de casos de estudio con características similares, resaltando el clima predominantemente árido y semiárido, así como aspectos hidrogeológicos y geológicos semejantes. Se resaltó tener siempre en cuenta que las muestras analizadas provienen de un acuífero somero, aunado a la importante complejidad litológica presente en la zona estudiada. Como parte de este último aspecto, es importante destacar la influencia de la marcada división entre el dominio de tobas andesíticas hacia el norte y de la Formación Tehuacán hacia el sur, esta última descrita en la presente tesis de forma muy general pero que trabajos como Dávalos-Alvarez et al. (2007) han reportado a detalle la composición de rocas provenientes de distintos orígenes. El análisis de este contraste resulta de gran interés pues representa distintos tipos de ambientes geológicos y se infiere que debido a esta característica se desarrollen diferentes procesos hidrogeoquímicos que se espera puedan ser caracterizados con ayuda de los diagramas seleccionados.

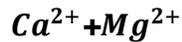
El siguiente aspecto dominante en la determinación de los diagramas bivariados a analizar fueron los resultados derivados de los diagramas de Piper, Mifflin y Gibbs, en los cuales se identificaron procesos de mezcla, intercambio iónico directo e inverso, evaporación y precipitación. La importancia de la integración de los resultados de estos diagramas radica en lograr el entendimiento del por qué dominan ciertos procesos en distintas áreas y buscar el origen de los iones mayoritarios.

Diagrama Cl^- vs Na^+

En este diagrama, la línea 1:1 es interpretada como una tendencia a la disolución de halita (Cerling et al., 1989; Fisher & Mullican, 1997; Ishaku et al., 2015).

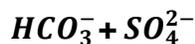
Además, se resaltan dos secciones correspondientes a intercambio iónico inverso y meteorización de silicatos o intercambio iónico (Morán-Ramírez et al., 2022; Nsabimana & Li, 2023).

Diagrama Na^+ vs



Tomado de Nsabimana & Li (2023), permite diferenciar dos tendencias principales. Sobre la línea 1:1 se marca el intercambio iónico inverso, mientras que por debajo de esta existe un intercambio iónico directo.

Diagrama $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ vs



Kortatsi (2006) indica que esta gráfica representa las fuentes de iones mayoritarios. La línea 1:1 marca la separación entre los procesos de intercambio iónico directo e intercambio iónico inverso. Además, Kortatsi (2006) resalta que la tendencia sobre la línea 1:1 podría indicar que la disolución de yeso, calcita o dolomita corresponde al proceso dominante. Por otro lado, un comportamiento con tendencia a la parte superior de esta línea 1:1 indica el agotamiento de Ca^{2+} y Mg^{2+} con respecto al SO_4^{2-} y HCO_3^- .

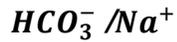
Diagrama Ca^{2+} vs SO_4^{2-}

Con el Ca^{2+} en el eje de las abscisas y SO_4^{2-} en el eje de las ordenadas, Nsabimana & Li (2023) establece que las muestras sobre la línea 1:1 están influenciadas por el proceso de disolución de yesos. En el área superior a esta línea, dominan la disolución de anhidrita o de sulfuros, y por debajo de esta tendencia, existen procesos de meteorización de silicatos o de intercambio iónico inverso.

Diagrama Ca^{2+} vs Mg^{2+}

Con el Ca^{2+} en el eje de las abscisas y el Mg^{2+} en el eje de las ordenadas, Nsabimana & Li (2023) resalta dos líneas de tendencia importantes. Sobre la línea 1:1 destaca el proceso de precipitación de $CaCO_3$, mientras que, por debajo de esta, y encima de la línea 1:2, domina el proceso de meteorización de silicatos.

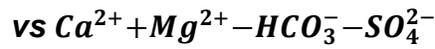
Diagrama Ca^{2+}/Na^+ vs



Destacable en la determinación del origen de cationes-aniones (Chen et al., 2022). El diagrama es útil a la hora de evaluar los impactos de los silicatos, carbonatos y evaporitas en la composición del agua subterránea. Esto se puede observar en diversos estudios (Chen et al., 2022; Morán-Ramírez, 2018; Nsabimana & Li 2023), en donde se delimitan zonas que engloban a las muestras que presentan el desarrollo de los distintos tipos de procesos como dominantes.

Los valores bajos de Ca^{2+}/Mg^{2+} se atribuyen al predominio de la meteorización de silicatos y los valores altos de esta misma relación, a la meteorización de calcita. En Morán-Ramírez (2018) este diagrama bivariado sirve para la distinción de zonas de recarga, evaporación, meteorización de silicatos y de carbonatos. El trabajo de Nsabimana & Li (2023) permite diferenciar las zonas por cuadrantes.

Diagrama $Na^+ + K^+ - Cl^-$



Mediante este diagrama se puede realizar un reconocimiento de las muestras a las que se les puede atribuir un proceso de intercambio iónico, estas se encuentran sobre una línea con pendiente -1. Por otro lado, las muestras que se acercan al valor cero en el eje x no estarán influenciadas por este proceso. De acuerdo con Kortatsi (2006) esta tendencia hacia la línea de pendiente de unidad negativa puede reconocerse como una explicación para el dominio de sodio como resultado de un proceso de intercambio catiónico. En cambio, si el proceso dominante fuera otro, como la meteorización de silicatos, la tendencia irá marcada hacia la línea con pendiente -2.

Índice CCR vs Cl^-



En donde el índice CCR corresponde a la relación:

$$CCR = \frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{Cl^-} - \frac{Na^+ + K^+}{Cl^-}$$

El CCR se puede utilizar para comparar relaciones de iones con respecto a cloruros (Morán-Ramírez, 2018; Owen & Cox, 2015). En este caso en la fórmula se puede observar el uso de cationes, separando especialmente Ca^{2+} y Mg^{2+} de Na^+ y K^+ , ambos en relación con los cloruros.

Cuando el Ca^{2+} y Mg^{2+} dominen, el índice tendrá un signo positivo, mientras que, si predominan Na^+ y K^+ , el CCR será negativo. Otro aspecto relevante es que, si los cloruros siguen los cambios en las concentraciones de los cationes mayoritarios establecidos en la relación, es poco probable que el índice adquiera un valor > 1 y < -1 , mientras que, si estos cambios suceden de forma independiente, las muestras podrán estar fuera del rango mencionado.

Presentar este índice contra una relación $(Cl^-)/(Alk+ Cl^-)$, permite evaluar además la tendencia a concentraciones más altas de cloruros a la derecha, o bien de predominio de alcalinidad (bicarbonatos) hacia la izquierda. Además, Morán-Ramírez (2018) destaca la utilidad del diagrama para identificar los procesos de intercambio iónico y evapotranspiración. Con la relación mencionada, se presentan cuatro cuadrantes, en sentido de las manecillas del reloj, cada uno engloba los siguientes procesos: evapotranspiración, meteorización + evapotranspiración, intercambio iónico (Morán-Ramírez, 2018).

3.4 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

3.4.1. Comparación con los Límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021- y la EPA

Se compararon los valores de cada muestra con respecto a las normas mexicana, (NOM-127, 2021) y a la regulación actual provista por la EPA (2009), se analizaron datos estadísticos de los resultados y posteriormente fueron mapeados, realizando una interpolación con el método IDW con el objetivo de establecer las zonas que se infiere se encuentran dentro y fuera de los límites permisibles.

La necesidad de estandarizar cuantitativamente si las características del agua subterránea son apropiadas o no para el consumo humano, ha dado pauta a la generación de índices de calidad que permiten realizar clasificaciones y evaluar la

idoneidad para su utilización en diversos fines. En la presente tesis se calcularon los índices de calidad del agua (ICA) e índice de contaminación (ICON), para la evaluación del agua para consumo humano, se comenta su distribución y se plantean hipótesis para el análisis de tales resultados.

3.4.2. Cálculo de índices de calidad para consumo humano y clasificación

3.4.2.1 Índices de calidad (ICA)

La metodología para el cálculo del ICA fue propuesta en principio por Horton (1965) y Liebman (1969). Posteriormente, destaca el método propuesto por la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF-National Science Foundation) de los Estados Unidos de Norteamérica, que resulta útil en el objetivo de evaluar la calidad del agua subterránea mediante el empleo de técnicas multiplicativas y de ponderación que requieren la asignación de pesos específicos para la concentración de cada uno de los parámetros integrados (Rubio-Arias et al., 2014).

La fórmula utilizada para el cálculo del ICA Horton (1965) y Liebman (1969) es la siguiente:

$$ICA = k \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Donde:

k = Constante asignada de acuerdo con las características físicas de la muestra

C_i = Valor porcentual asignado al parámetro

P_i = Peso asignado al parámetro

n = Número de variables incluidas

Los parámetros que se integran en la metodología son: pH, Temperatura, Dureza, CE, STD, Cl^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Las constantes en relación con las características físicas de las muestras fueron asignadas con un valor de 1. El valor fue seleccionado por las condiciones generales de las aguas muestreadas y

buscando su correspondencia con lo descrito en la Tabla 1 tomada de Conesa (1993).

Tabla 1. Constantes asignadas para el ICA

Constante	Características del agua
1	Para agua claras sin aparente contaminación.
0.75	Para aguas con ligero color, espuma, turbidez y fuerte olor.
0.5	Para agua con apariencia de estar contaminada y fuerte olor.
0.25	Para aguas negras que presentan fermentaciones y olores.

Para la asignación del valor porcentual atribuido a cada parámetro de acuerdo con su concentración (Tabla 2), se adaptó la clasificación presentada por Conesa (1993).

Los pesos asignados a cada parámetro (Tabla 2) también fueron obtenidos de Conesa (1993).

Tabla 2. Valores porcentuales y pesos asignados para el ICA

VALOR	pH	Temp (°C)	Dureza (mg- CO₃Ca/l)	CE	STD (mg/L)	Cl (mg/L)	SO₄ (mg/L)	NO₃ (mg/ L)	Na (mg/ L)	Ca (mg/ L)	Mg (mg/ L)
0	1 o 4	>50 o <-8	1500	16000	20000	1500	1500	100	500	100	500
10	2 o 13	45 o -6	1000	12000	10000	1000	1000	50	300	600	300
20	3 o 12	40 o 4	800	8000	5000	700	600	20	250	500	250
30	4 o 11	36 o -2	600	5000	3000	500	400	15	200	400	200
40	5 o 10	32 o 0	500	3000	2000	300	250	10	150	300	150
50	6 o 9.5	30 o 5	400	2500	1500	200	150	8	100	200	100
60	6.5	28 o 10	300	2000	1000	150	100	6	75	100	75
70	9	26 o 12	200	1500	750	100	75	4	50	50	50
80	8.5	24 o 14	100	1250	500	50	50	2	25	25	25
90	8	22 o 15	50	1000	250	25	25	1	15	15	15
100	7	21 o 16	25	750	100	0	0	0	10	10	10
PESO	1	1	1	4	2	1	2	2	1	1	1

Se identificaron las funciones que más se ajustaran a la relación entre las concentraciones medidas de cada parámetro con lo indicado en la Tabla 2, que relaciona concentraciones puntuales con valores porcentuales. Así se desarrolló un código en el lenguaje computacional Matlab para introducir las series de concentraciones de cada muestra.

Para la clasificación de los valores obtenidos, incluidos en un rango del 0 al 100, se utilizó la propuesta de (Conesa, 1993).

Tabla 3. Clasificación de calidad para el ICA

Clase	Escala ICA	Recomendaciones de uso
90 – 100	Excelente	No requiere purificación para su consumo.
80 – 90	Aceptable	Requiere una purificación menor.
70 – 80	Levemente contaminada	Dudosa para consumo sin purificación.
50 – 70	Contaminada	Tratamiento de purificación indispensable.
40 – 50	Fuertemente contaminada	Dudosa para consumo.
0 - 40	Excesivamente contaminada	Inaceptable para consumo.

3.4.2.2 Índices de contaminación (ICON)

Matemáticamente, este índice relaciona las concentraciones de los parámetros ingresados (en este caso de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos) con los límites máximos permisibles reportados por normas nacionales (como la NOM-127-SSA1, 2021, en el caso de México) y regulaciones internacionales (como la propuesta por la Environmental Protection Agency, EPA). La ventaja de este índice es que permite combinar los efectos de distintos parámetros importantes a la hora de determinar la calidad del agua para el uso doméstico. Se analiza por separado para cada muestra.

En la presente tesis los parámetros utilizados para el cálculo del índice son: STD, Dureza, NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y Na^+ . Numéricamente los índices obtenidos pueden ser negativos o positivos, lo cual estará relacionado con el hecho de si los valores se encuentran o no dentro de lo indicado por la norma correspondiente. Los índices negativos permiten asumir que los límites permisibles no han sido rebasados,

mientras que los positivos, indicarán la existencia de problemas de contaminación (Backman et al., 1998).

Matemáticamente se calcula con la siguiente fórmula:

$$ICON = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1$$

Donde:

C_{fi} = Factor de contaminación para el i-ésimo parámetro.

C_{Ai} = Valor analítico del i-ésimo parámetro.

C_{Ni} = Límite máximo permisible del i-ésimo parámetro.

La clasificación para los índices de contaminación obtenidos fue tomada de Backman et al. (1998) y se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de calidad para el ICON

Rangos	Clasificación del índice de Contaminación
< 1	Baja
1 – 3	Media
>3	Alta

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1 MODELO CONCEPTUAL INICIAL

4.1.1 Evaluación geohidrológica de la permeabilidad

El acuífero evaluado en la presente tesis es el más somero de la zona de estudio, y su extensión está cubierta principalmente por los Valles de Tehuacán y Tecamachalco. Por esta razón se ha decidido aprovechar la información litológica y estructural proveída por cartas a escala 1:50000 del Servicio Geológico Mexicano, así como por estudios a detalle, enfocados en la geología del área estudiada (Mendoza-Rosales, 2010; Ortega-Gutiérrez, 1978). Esto con el fin de realizar una evaluación detallada del comportamiento de la permeabilidad.

Existen clasificaciones basadas en características litológicas como las aplicadas en la determinación de índices de vulnerabilidad acuífera con métodos como el DRASTIC que se han utilizado en diversas investigaciones como: (Chakraborty et al., 2021; Fannakh & Farsang, 2022; Rama et al., 2022; Yu et al., 2022), por mencionar algunas. Sin embargo, considerando que en esta tesis se ha realizado una extensa revisión de las características de cada Formación presente en la zona de estudio, no solo a nivel litológico, sino también estructural, de ambientes de depósito y características generales representativas de las edades en las cuales se depositaron y los sucesos aunados a estas, se decidió hacer una evaluación de permeabilidad a detalle. Para tal objetivo se planteó la siguiente escala:

- Alta permeabilidad
- Buena permeabilidad
- Permeabilidad media
- Baja permeabilidad
- Impermeable

PRECÁMBRICO

TRONCO DE TOTOLTEPEC

Los cuerpos ígneos intrusivos característicamente son impermeables. Además, la descripción más detallada especificada no aporta elementos que infieran revalorar la calificación de impermeabilidad propuesta.

FORMACIÓN XAYACATLAN

La prevalencia de rocas metamórficas en esta Formación, así como la ausencia de fracturamiento importante u otras características con influencia en el incremento de la permeabilidad, conllevan a asumir esta Formación como impermeable.

GRANITO COSAHUICO

Una de las características hidrogeológicas más importante de los intrusivos graníticos es que se consideran impermeables.

CUARZOMONZONITA-DIORITA

Las características inherentes a este tipo de rocas intrusivas permiten asignar un carácter impermeable a estos cuerpos.

PALEOZOICO

ORDOVÍCICO

COMPLEJO ACATLÁN

El dominio de rocas metasedimentarias y metaígneas en este complejo, así como los eventos de recristalización mencionados, son claves en su valoración geohidrológica como impermeable.

FORMACIÓN COSOLTEPEC

El carácter metamórfico de las rocas que constituyen la Formación, así como la ausencia de fracturamiento importante, son factores que permiten evaluar esta parte de la zona de estudio como impermeable.

DEVÓNICO

FORMACIÓN TECOMATE

Las características del metaconglomerado presente, así como la presencia de mármoles permiten atribuir en principio una buena permeabilidad a esta Formación; sin embargo, la existencia de tobas, así como de metalutitas, conllevan a la necesidad de reducir esta calificación, clasificándola como de permeabilidad media.

PÉRMICO

FORMACIÓN MATZITZI

La descripción de la composición de esta Formación con predominio de areniscas, así como la presencia de conglomerados, confieren características favorables de permeabilidad. Sin embargo, las intercalaciones mencionadas con lutitas conllevan a evaluar a la Formación como de permeabilidad media.

MESOZOICO

JURÁSICO MEDIO

FORMACIÓN TECOMZACHIL

La permeabilidad hacia la base se puede evaluar como buena debido a la presencia de conglomerado y areniscas; sin embargo, el predominio de limolita mencionado hacia la cima infiere atribuirle una menor calificación, por esto se considera como de permeabilidad media.

GRUPO TECOCONYUCA INDIFERENCIADO

La descripción de la composición de esta Formación en donde dominan areniscas y conglomerados permite atribuirle una alta permeabilidad.

FORMACIÓN PIEDRA HUECA

La intercalación de conglomerados y areniscas sugieren características favorables para la permeabilidad en la Formación, sin embargo; el contenido de lutitas y la descripción de algunos niveles de arenisca de grano fino en matriz arcillosa y con

cementación moderada de sílice, contribuyen a disminuir la calificación de la permeabilidad para esta Formación.

FORMACIÓN OTLALTEPEC

A pesar de la descripción sobre presencia de limolita y lutita, destaca en gran medida el contenido de areniscas con cementación moderada, así como de granos que se pueden desprender. Además, se hace énfasis en la comparación sobre el contenido arcilloso, destacándose la Formación Otlaltepec por ser menos arcillosa. Por estas razones se asigna una alta permeabilidad a esta Formación.

CRETÁCICO INFERIOR

COMPLEJO MILONÍTICO SIERRA DE JUÁREZ (JURÁSICO TARDÍO – CRETÁCICO TEMPRANO)

Las características descritas permiten evaluar este complejo como impermeable.

FORMACIÓN ZAPOTITLÁN

La prevalencia de lutitas y margas permiten valorar a la Formación Zapotitlán como impermeable. Además, a pesar de que se menciona presencia de conglomerado grueso y areniscas, las intercalaciones con lutitas también mencionadas, no se consideran un factor que pueda influir en asignar una mayor valoración de permeabilidad a esta Formación.

FORMACIÓN CHIVILLAS

Las estructuras dominantes corresponden a almohadillas de flujos de lava basálticos, hidrogeológicamente estas características permiten asignar una nula permeabilidad a la Formación. La interacción con los estratos mencionados de distintas granulometrías, siguen la tendencia hacia condiciones de permeabilidad no favorables, ya que se infiere que los materiales más finos de la Formación rellenan los espacios que favorecerían el flujo del agua en la zona.

FORMACIÓN SAN JUAN RAYA

La presencia frecuente de estratos de lutita en esta Formación es de gran importancia, y el hecho de que además se encuentra dispuesta en estratos medianos a gruesos, sugiere atribuir una tendencia mayormente impermeable a la Formación.

FORMACIÓN AGUA DE CORDERO

La definición refiere el dominio de conglomerados polimícticos y areniscas. En donde el conglomerado presenta una morfología angulosa a subredondeada, además se destaca la presencia de brechas procedentes del complejo Acatlán. Las características morfológicas de los constituyentes descritos permiten atribuir a la Formación Agua de Cordero una buena permeabilidad. Aunado a estas características, el ambiente de formación descrito es característico de áreas de abundantes recursos hídricos.

FORMACIÓN MAGDALENA

FORMACIÓN MAGDALENA

A pesar de la descripción, de que parte de la Formación consiste en areniscas y conglomerado polimíctico, la presencia de margas y lutitas conllevan a valorar esta formación como de baja permeabilidad.

FORMACIÓN ORIZABA

El dominio de las calizas y dolomías de esta Formación, además de la presencia de brecha calcárea conllevan a valorar esta Formación como altamente permeable.

FORMACIÓN MORELOS

La distribución mayoritaria de capas de calizas y dolomías, la casi nula presencia de arcillas y lutitas, y la baja proporción de pedernal encontrados en la Formación, permiten evaluarla como altamente permeable.

FORMACIÓN MIAHUATEPEC

Las características de las calizas que constituyen esta Formación, así como la descripción correspondiente a la presencia de bandas de pedernal, conlleva a evaluar la Formación como de permeabilidad media.

FORMACIÓN COYOTEPEC

La característica principal que define esta Formación es que está constituida básicamente por calizas biomicritas. Esta condición no solo permite valorar la Formación como altamente permeable, sino que infiere resaltarla en este estudio, dadas las importantes características de permeabilidad.

CRETÁCICO SUPERIOR

FORMACIÓN MALTRATA

La presencia de lutitas en la Formación, así como las características texturales que presentan las calizas y su intercalación con sedimentos arcillosos, conllevan a evaluar esta Formación como impermeable.

FORMACIÓN MEZCALA

El predominio de margas y lutitas en esta Formación permite considerarla como impermeable.

FORMACIÓN GUZMANTLA

Las características de las calizas presentes en la Formación, junto con la evidencia de karsticidad, permiten inferir una alta permeabilidad; sin embargo, la descripción de intercalaciones arcillosas, así como el relleno de fracturas con limo vadoso, resultan en la disminución de esta evaluación, por lo que se considera de buena permeabilidad.

FORMACIÓN MÉNDEZ

A pesar de la mención de presencia de areniscas, el prediminio de lutitas en esta Formación, conlleva a evaluarla como impermeable.

CENOZOICO

TERCIARIO

FORMACIÓN COATZINGO

La unidad superior tiene características favorables para ser permeable, dadas las características litológicas, así como el ambiente mencionado de tipo fluvial. Por esta razón la evaluación de la Formación resulta en una permeabilidad media.

FORMACIÓN BALSAS (OLIGOCENO)

El destacable contenido de conglomerado polimíctico, arenisca y limolita permite valorar esta Formación como de buena permeabilidad.

FORMACIÓN TEHUACÁN

La estratigrafía de esta zona es muy compleja, en el presente trabajo, se considera un mapa geológico basado en lo dispuesto por el (SGM, 1998, 2001, 2006a, 2006b, 2011, 2012, 2017, 2018a, 2018b, 2019); sin embargo, la interpretación más detallada, realizada por Dávalos-Álvarez et al. (2007), se toma en cuenta en la búsqueda de tener un conocimiento más amplio del comportamiento del agua subterránea y su composición en esta área del estudio. Interpretando las características de lo que se conoce como el Valle de Tehuacán (simplificado como Formación Tehuacán en la presente tesis).

La definición de una granulometría variada en la parte superior del Valle y de un medio poroso en la parte inferior, aunadas al registro de intercalación de gravas, arenas y limos con presencia de calizas lacustres y travertinos son una clara representación de la alta heterogeneidad característica de esta zona del estudio, que se debe en parte a los distintos ambientes sedimentarios que tuvieron lugar sobre y alrededor del Valle de Tehuacán (CONAGUA, 2020).

La evaluación de las características mencionadas permite asignar una calificación de permeabilidad media para esta parte del área de estudio.

FORMACIÓN HUAJUAPAN

El predominio descrito de conglomerados, areniscas y algunas tobas, permite suponer una buena permeabilidad en la Formación; sin embargo, la mención de la existencia de una matriz arenosa con cementante calcáreo conlleva a replantear la asunción propuesta, otro aspecto corresponde al ambiente de depósito, lacustre, características que permiten valorar la Formación como de permeabilidad baja.

ANDESITA DEL OLIGOCENO

La descripción de textura afanítica para esta unidad, permite atribuirle como impermeable. Además, no se menciona como fracturada, por lo cual no es posible asignarle alguna característica que favorezca el flujo o almacenamiento de agua subterránea.

FORMACIÓN COAYUCA

La descripción de predominancia de composición siliciclástica y yesífera permiten valorar esta Formación como impermeable.

BASALTO DEL PLEISTOCENO

De acuerdo con (INEGI, 2019), los basaltos en esta zona se encuentran en bloques con abundantes fracturas abiertas, que normalmente están interestratificados con brechas y depósitos de lapilli altamente permeables. Es por lo mencionado que se les evalúa como altamente permeables.

CUATERNARIO

TOBA ANDESÍTICA

La característica destacable es la baja consolidación del material ubicado en esta área del estudio, así como la presencia de arenas y gravas. Este tipo de granulometría sugiere la atribución de una alta permeabilidad; sin embargo, las características intrínsecas de las tobas, que por el peso se van consolidando hacia la base, restan la alta calificación asignada previamente. Por lo tanto, se decidió considerar esta unidad como de buena permeabilidad.

GRAVA-ARENA DEL PLEISTOCENO

Las características intrínsecas de este tipo de material que consiste en gravas y arenas permiten evaluar estos depósitos como de alta permeabilidad.

CONGLOMERADO POLICMÍTICO-ARENA

Las características de depósito de pie de monte y presencia de travertinos permiten sugerir una buena permeabilidad; sin embargo, la mención sobre la mala clasificación que incluye el material conglomerático en forma de matriz arcillosa da pie a disminuir la calificación de permeabilidad, reduciéndola a media.

ALUVIAL RECIENTE (HOLOCENO)

Las características inherentes al material de tipo aluvial, permiten asignar a esta unidad una alta permeabilidad.

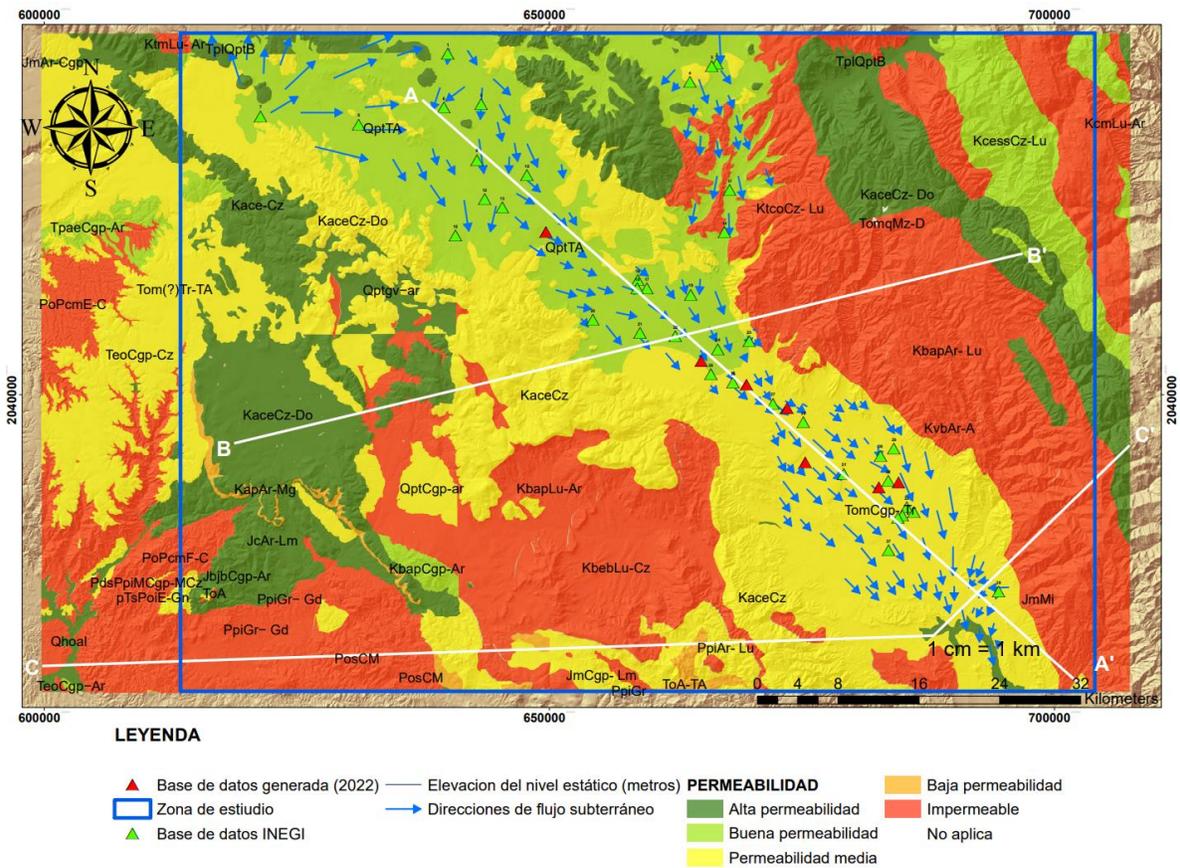


Figura 9. Mapa de evaluación de permeabilidad en la zona de estudio

4.1.2 Secciones geológicas

El análisis del conjunto de información geológica e hidrogeológica permite definir una idea conceptual inicial del funcionamiento del flujo subterráneo en la zona de estudio, las entradas, la dirección, y los materiales que atraviesa. El interés se enfoca en la sección AA' (Figura 10), ya que es en esta zona donde se concentra la mayor cantidad de datos hidrogeoquímicos, tanto obtenidos de datos abiertos (INEGI, 2010a, 2010b) como de la base de datos creada en la presente tesis, como uno de los objetivos planteados. Considerando las características de las formaciones presentes en la zona, predominantemente impermeables, sobre todo en la parte oeste, se asume que el proceso de caracterización con la información disponible es válido únicamente para una zona delimitada.

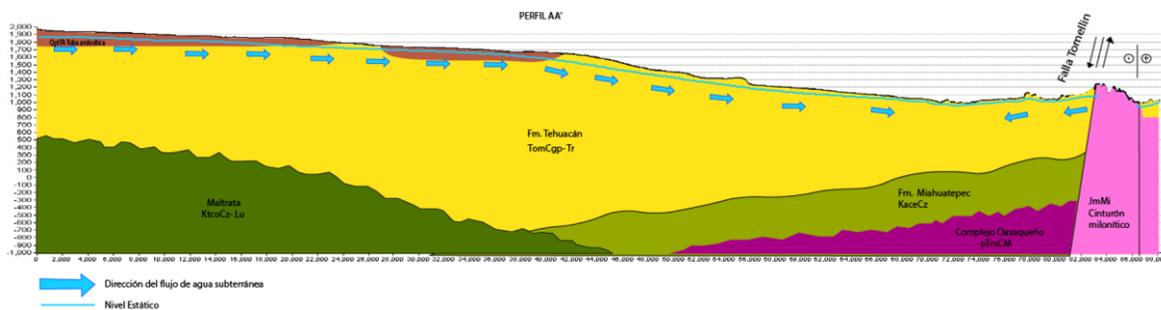


Figura 10. Perfil geológico A-A'

Adicionalmente, se realizaron dos secciones geológicas más, priorizando también la presencia de datos hidrogeoquímicos; así como, de formaciones permeables.

La realización de estas secciones contribuye en la delimitación de la zona de influencia, encontrando que la dirección de flujo en el Valle está determinada por la topografía y no hay conexión de flujos provenientes de las partes este y oeste, debido a la presencia de formaciones impermeables y altos topográficos, que restringen la continuación del flujo.

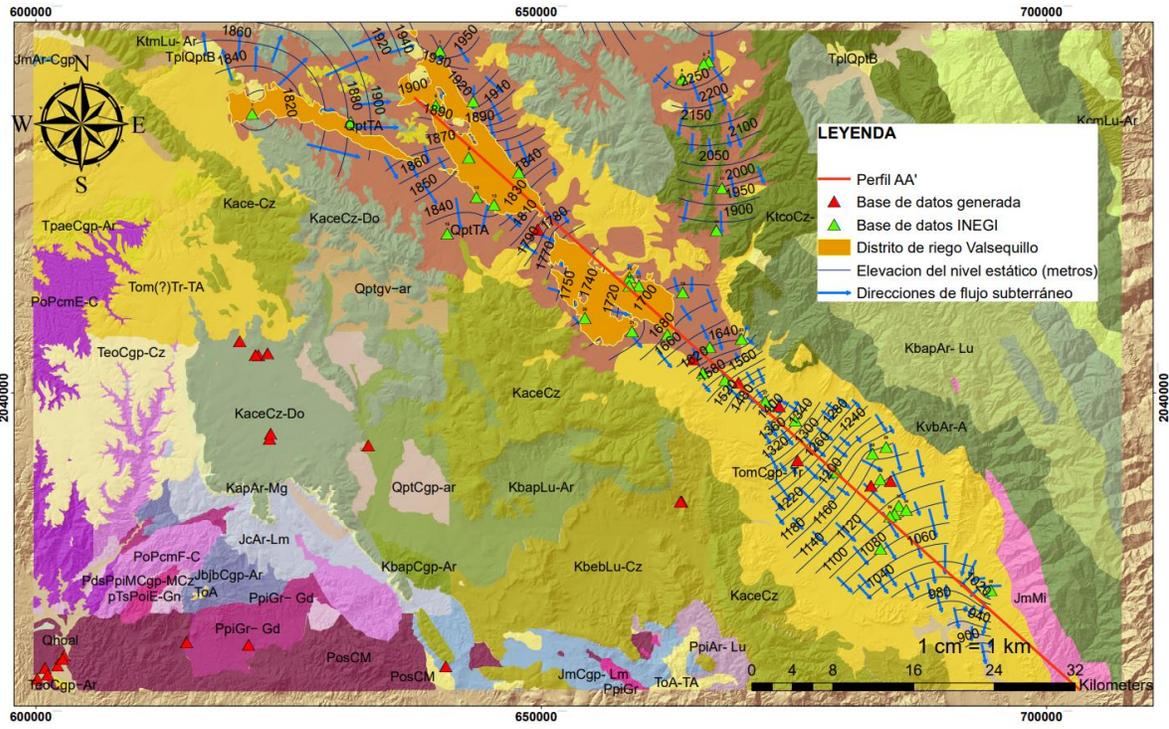


Figura 11. Modelo conceptual inicial

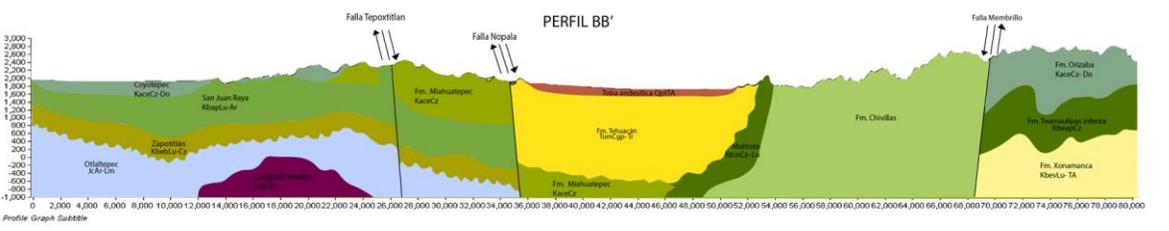


Figura 12. Perfil geológico B-B'

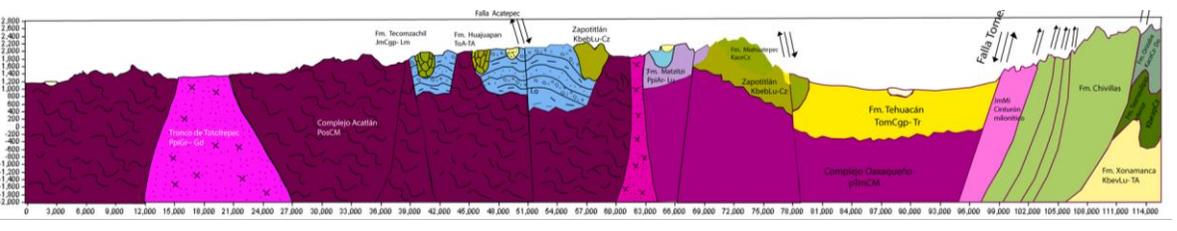


Figura 13. Perfil geológico C-C'

4.2 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

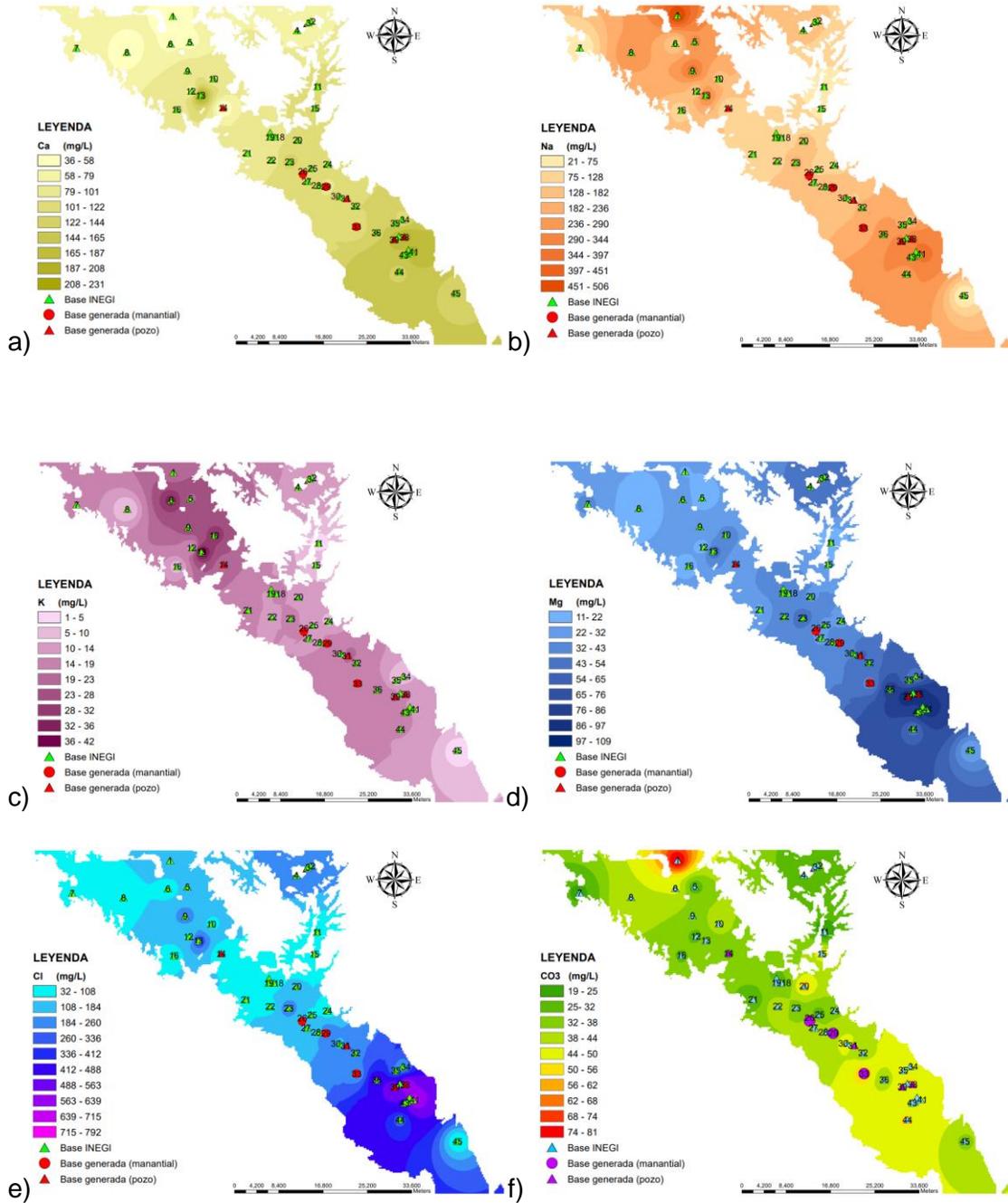
4.2.1 Secuencia general de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos

La secuencia general de predominancia de iones en el caso de los cationes es la siguiente $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ y $HCO_3^- > CO_3^{2-} > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ para los aniones. Desde este primer análisis se infiere la presencia de zonas de recarga, así como de mezcla que permiten la continuación de la presencia de HCO_3^- , de ahí la abundancia de este ion. El hecho de que como segundo anión predominante se encuentre el Cl^- en lugar del SO_4^{2-} (Chebotarev, 1955) como secuencia general de aniones, indica además de la presencia de flujos más evolucionados, la ocurrencia de importantes procesos hidrogeoquímicos, así como la posible acción antrópica modificando la secuencia natural de los flujos.

Tabla 5. Estadísticas de los iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Valor Máximo	Muestra	Valor Mínimo	Muestra	Valor Promedio
Temperatura (°C)	31	38	19.3	2	24.41
pH	8.4	5	7	42	7.61
C.E.	2116	39	500	7	1173.37
S.T.D. (ppm)	2372.59	41	398	14	1094.89
Alcalinidad (meq/L)	634.61	8	214.71	3	412.24
Ca^{2+} (meq/L)	11.6	13	1.82	14	5.49
Mg^{2+} (meq/L)	8.97	39	0.91	12	3.58
Na^+ (meq/L)	22.01	1	0.92	45	8.15
K^+ (meq/L)	1.065	13	0.037	45	0.38
SO_4^{2-} (meq/L)	18	13	0.266	7	4.06
HCO_3^- (meq/L)	9.69	8	3.15	3	6.10
CO_3^{2-} (meq/L)	2.7	1	0.659	11	1.33
Cl^- (meq/L)	22.25	41	0.897	15	6.02
NO_3^- (meq/L)	1.3	5	0	45	0.49

4.2.6 Distribución espacial de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos



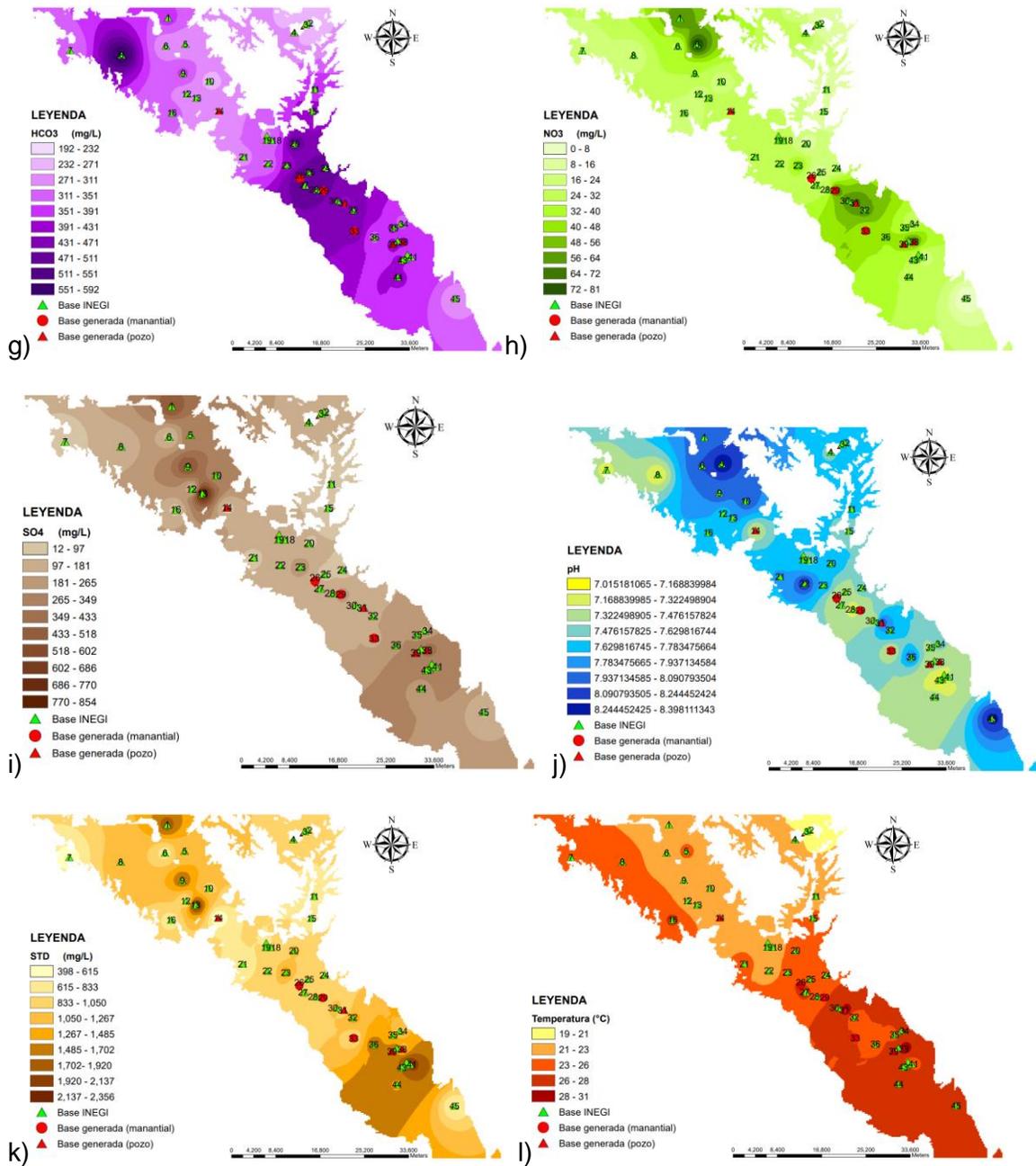


Figura 14. Mapas de distribución a) Ca^{2+} b) Na^+ c) K^+ d) Mg^{2+} e) Cl^- f) CO_3^{2-} g) HCO_3^- h) NO_3^- i) SO_4^{2-} j) pH k) STD l) Temperatura

4.2.3 Familias de agua

A partir del diagrama de Piper (Figura 15), se determinaron las familias dominantes en el área de estudio. La familia predominante es la Na-Ca-HCO₃-Cl, seguida de la Na-Ca-Mg-Cl, Ca-Na-Mg-HCO₃, y la Na-Mg-Ca-Cl.

El hecho de que la familia dominante este formada tanto por HCO₃⁻ y Cl⁻, como por Na⁺ y Ca²⁺ permite resaltar la importancia de un proceso de mezcla en la zona de estudio, además este aspecto se puede visualizar en el gráfico del diagrama de Piper, hacia el centro del diamante.

Dado el predominio de Cl⁻ en la segunda familia, se infiere tanto la influencia de flujos evolucionados como de la acción antrópica.

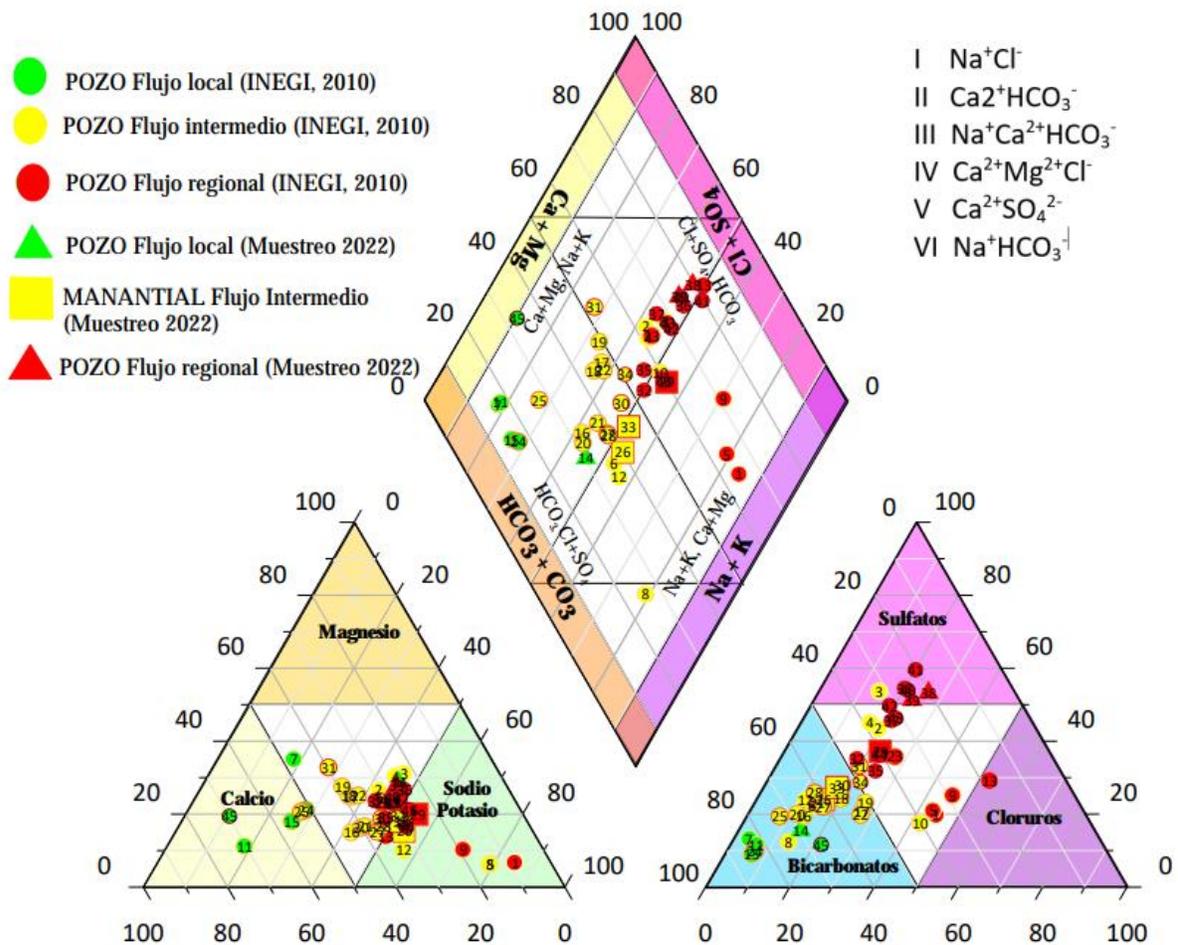


Figura 15. Diagrama de Piper

4.2.4 Sistemas de flujo de aguas subterráneas

El diagrama principal utilizado para esta determinación fue el de Miffilin (1968). En la zona de estudio se presentan los tres tipos de flujos mencionados por Tóth (1900), sin embargo, se encontró un predominio de flujos intermedios. Destacan zonas de flujo regional hacia el norte y de flujo local hacia la parte sureste, rompiendo con la secuencia general.

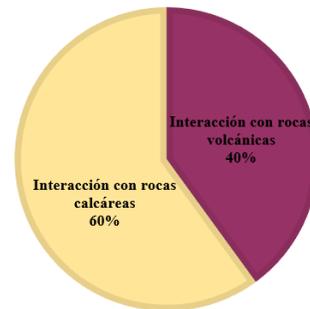
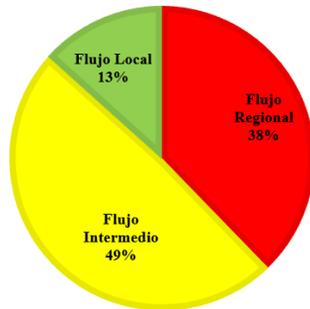


Figura 16. Tipos de flujos en la zona de estudio

Figura 17. Interacción con rocas calcáreas o volcánicas en la zona de estudio

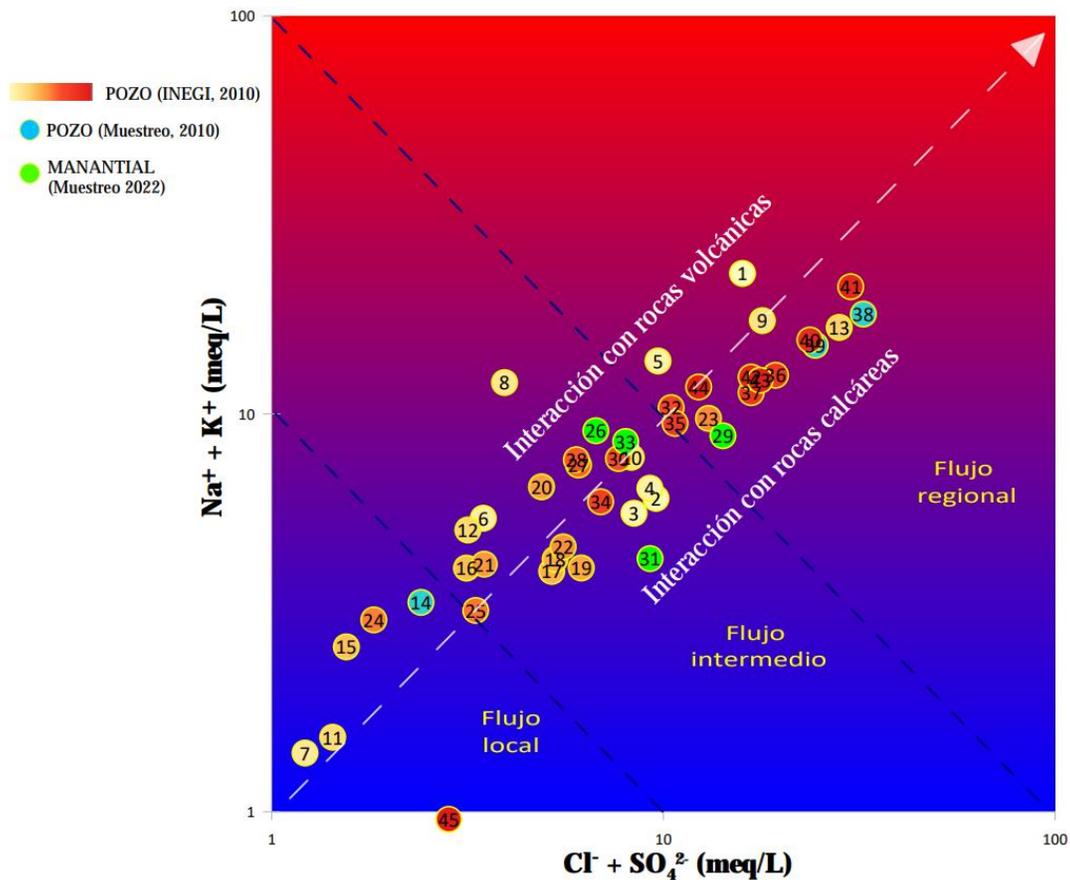


Figura 18. Diagrama de Miffilin

Mediante el diagrama de Mifflin (Figura 18), también fue posible establecer el dominio de interacción con rocas carbonatadas sobre este mismo proceso con rocas volcánicas. La Figura 18 sugiere la tendencia hacia una mayor evolución de noreste y noroeste a sureste.

4.2.5 Proceso hidrogeoquímico dominante en la zona de estudio

El diagrama de Gibbs (1970), permite asumir el predominio del proceso relacionado con la interacción agua-roca.

En la Figura 19, correspondiente al diagrama de radio Cl^- ; suponiendo una consideración de predominio del anión Cl^- a partir del valor 0.3 de la relación $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$, se puede observar el dominio de este ion, lo que indica que la familia predominante será clorurada. Esto corresponde con lo indicado en el diagrama de Piper (Figura 15) el cual establece que la familia principal es la Na-Ca-Mg-Cl.

Para la gráfica de radio Na^+ (Figura 19), la tendencia observada de dominio de sodio también se corresponde con la familia dominante determinada por el diagrama de Piper (Figura 15). Además, la distribución casi cercana al valor 0.5 indica la presencia favorable del Ca^{2+} .

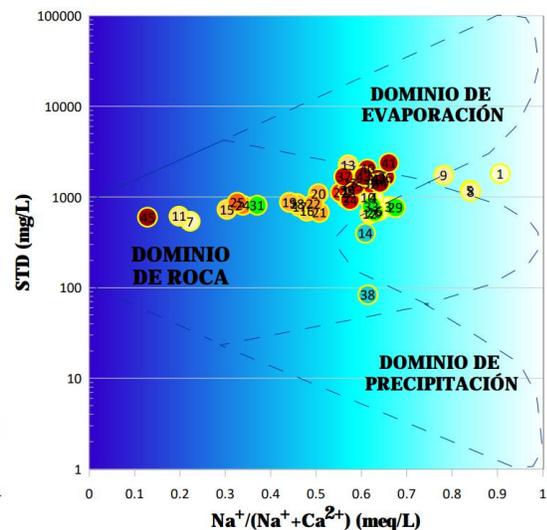
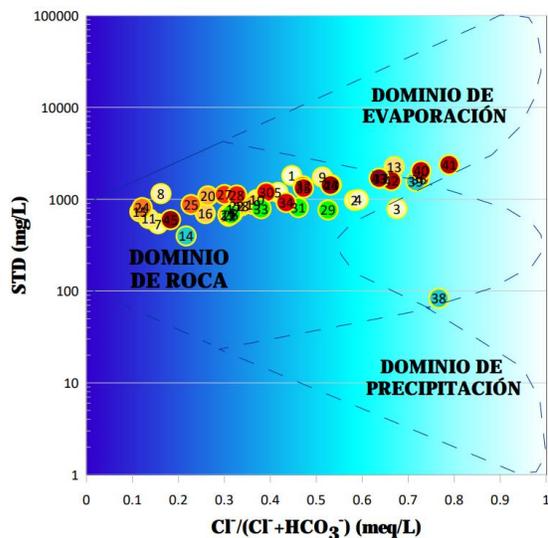
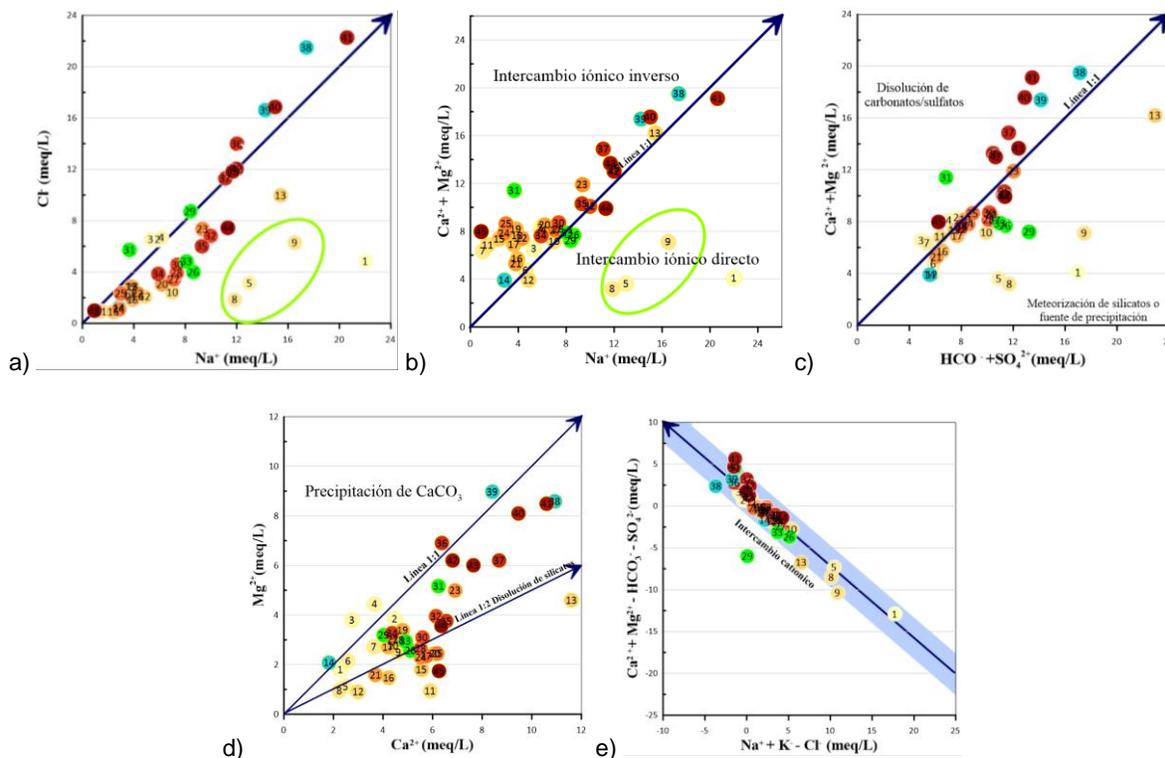


Figura 19. Diagrama de Gibbs, radio Cl^- Figura 20. Diagrama de Gibbs, radio Na^+

4.2.6 Identificación de procesos mediante diagramas bivariados

Estos diagramas se utilizaron con el fin de diferenciar entre distintos procesos que tienen lugar en la zona de estudio. Destacan el intercambio iónico directo e inverso, la meteorización de silicatos y carbonatos, la disolución y la precipitación de minerales.



**Figura 21. a) Na^+ vs Cl^- b) Na^+ vs $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ c) $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ vs $HCO_3^-+SO_4^{2-}$
d) Ca^{2+} vs Mg^{2+} e) $Na^++K^+-Cl^-$ vs $Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- -SO_4^{2-}$**

Na^+ vs Cl^-

Una mayor cantidad de muestras mantienen concentraciones más elevadas de sodio con respecto a los cloruros. La tendencia indicada es hacia los procesos de meteorización de silicatos o intercambio iónico directo (Morán-Ramírez et al., 2018).

Na^+ vs $Ca^{2+}+Mg^{2+}$

La mayor parte de las muestras, se engloban hacia la parte de intercambio iónico inverso. Las muestras 1,5,8 y 9 que se ubican en el Distrito de Riego Valsequillo experimentan un proceso de intercambio iónico directo; así mismo, analizando en

conjunto con la tendencia de flujo se encuentran como excepciones a este comportamiento las muestras: 12, 26, 29, 43, 41.

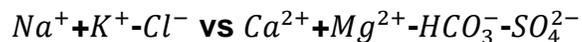


La mayor parte de las muestras se encuentran en el área de meteorización de silicatos (Morán-Ramírez et al., 2018) o fuente de precipitación (Nsabimana & Li, 2023). Las muestras 15, 19 y 23 caen sobre la línea 1:1, lo cual se relaciona como un dominio del proceso de disolución de yesos, anhidrita, calcita o dolomita (Kortatsi, 2006).



Se muestra un exceso de Ca^{2+} en la mayoría de las muestras, así como una tendencia hacia la zona delimitada por las líneas 1:1 y 1:2. Las muestras 36 y 39 destacan por su localización en la zona de precipitación de $CaCO_3$ (Figura 21d). Analizando su posición, se encontró que se ubican sobre la Formación Tehuacán, lo cual justifica el proceso mencionado anteriormente, dada la característica presencia de carbonatos de la Formación Tehuacán. Otro punto destacable es que se puede observar un contacto importante con la zona urbana.

Para la zona entre las líneas 1:1 y 1:2 se atribuye el proceso de intercambio iónico reversible. Además, la tendencia hacia la disolución de silicatos en la línea 1:2 permite separar zonas e inferir la diferenciación de procesos relacionados con intercambio iónico reversible y disolución de silicatos.



La tendencia marca el intercambio catiónico diferenciable principalmente entre Na^+ y Ca^{2+} . El proceso de intercambio se reduce hacia el sureste, ya que esa secuencia permite distinguir altos contenidos de Na^+ y bajos contenidos de Ca^{2+} . La evolución esta fragmentada por zonas, se puede distinguir una hacia el noroeste, con tendencia a la muestra 41 que en el diagrama de Miffilin (Figura 18) se asimila como la más evolucionada. Esto debido a que valores más altos de cloruros intervendrán en un desplazamiento hacia la izquierda siempre y cuando los valores de Na^+ no

sean sumamente altos, tal es el caso de las muestras 1 y 9 las cuales en el diagrama de Mifflin (Figura 18) aparecen como muy evolucionadas.

CCRindex vs $Cl^-/(Alk+Cl^-)$

La mayor parte de las muestras se encuentran en el cuadrante I, correspondiente al proceso de meteorización y liberación de HCO_3^- (Morán-Ramírez et al., 2018). Las muestras clasificadas anteriormente como flujos regionales muy evolucionados se engloban en el dominio del proceso de evapotranspiración y las muestras claras ubicadas dentro y cerca del distrito de riego se asocian con el proceso de intercambio iónico.

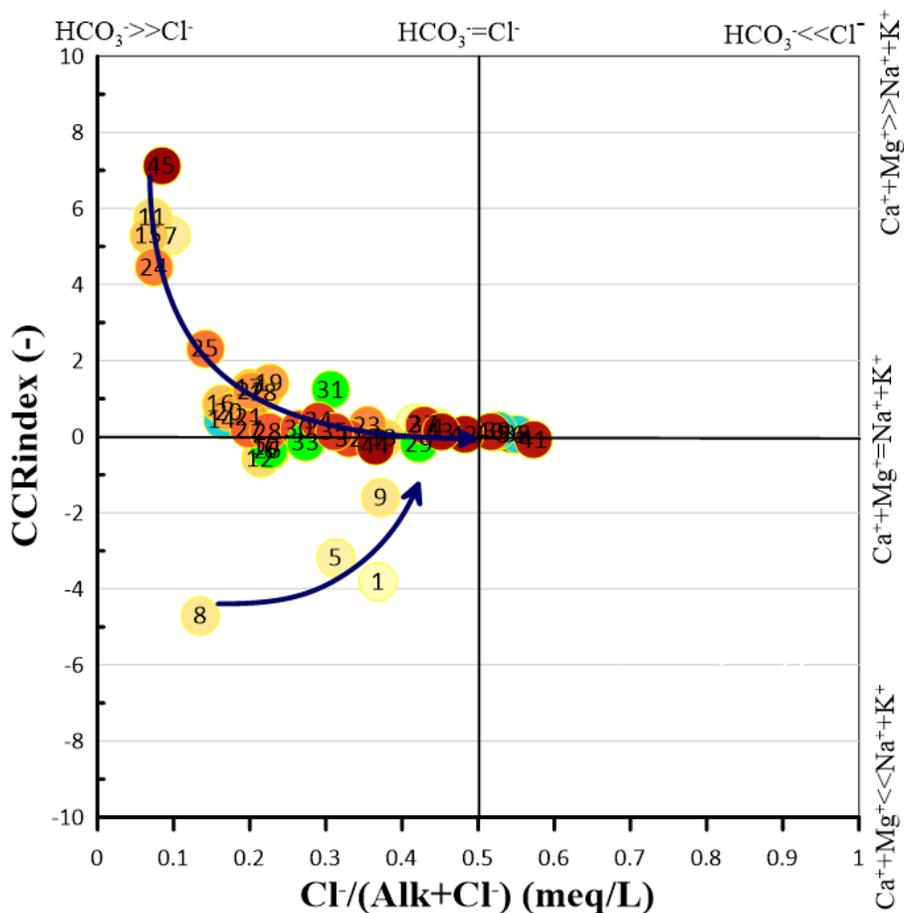
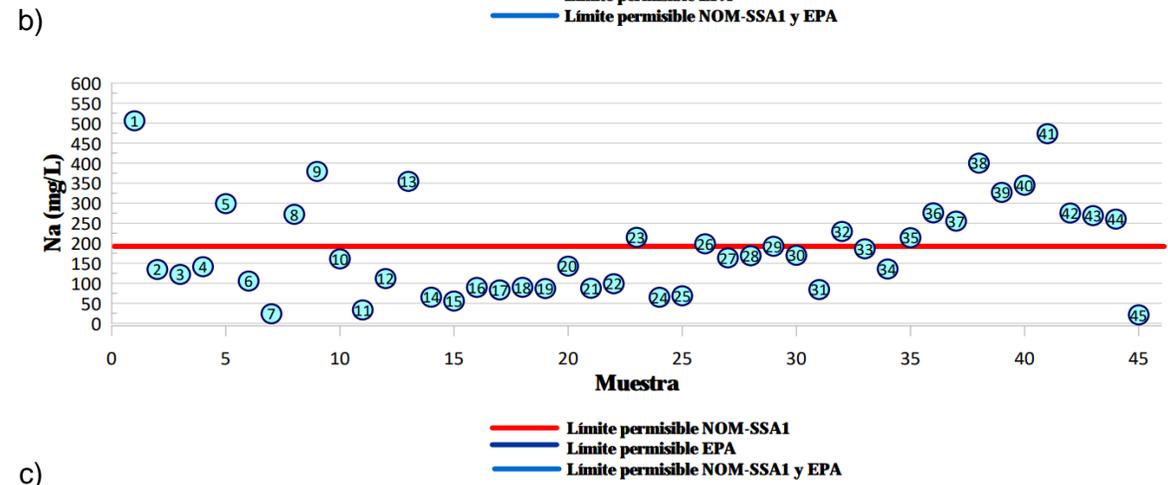
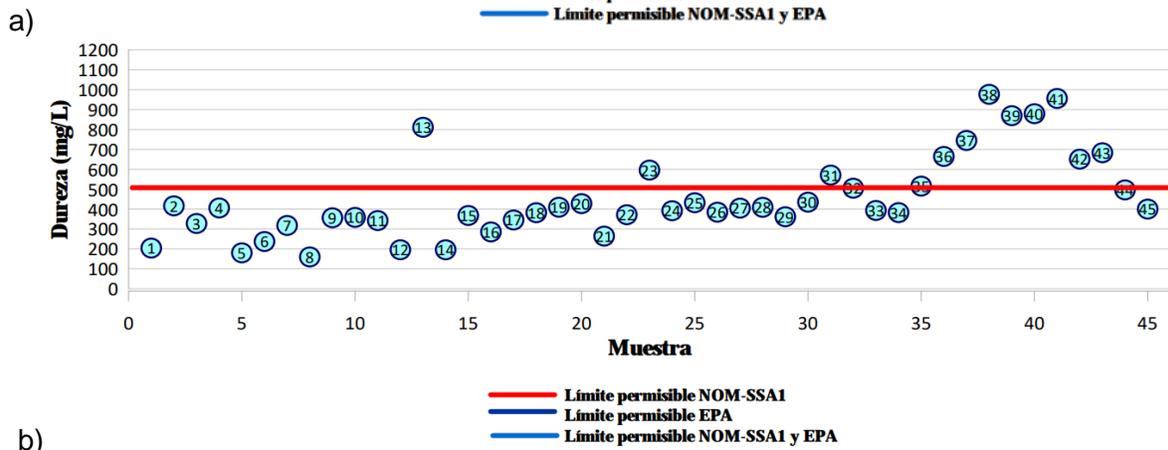
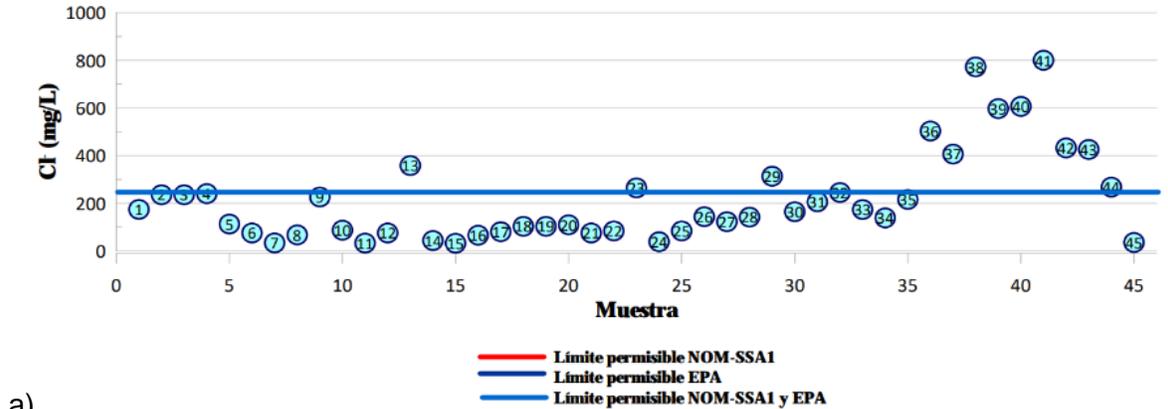


Figura 22. CCRindex vs $Cl^-/(Alk+Cl^-)$

4.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

4.3.1 Comparación con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1, 2021 y la EPA (2023)

Se presentan gráficas (Figura 23 a-f) que ofrecen una comparativa entre las concentraciones de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos con respecto a la NOM-127 (2021) y a la regulación proveída por la EPA (2009).



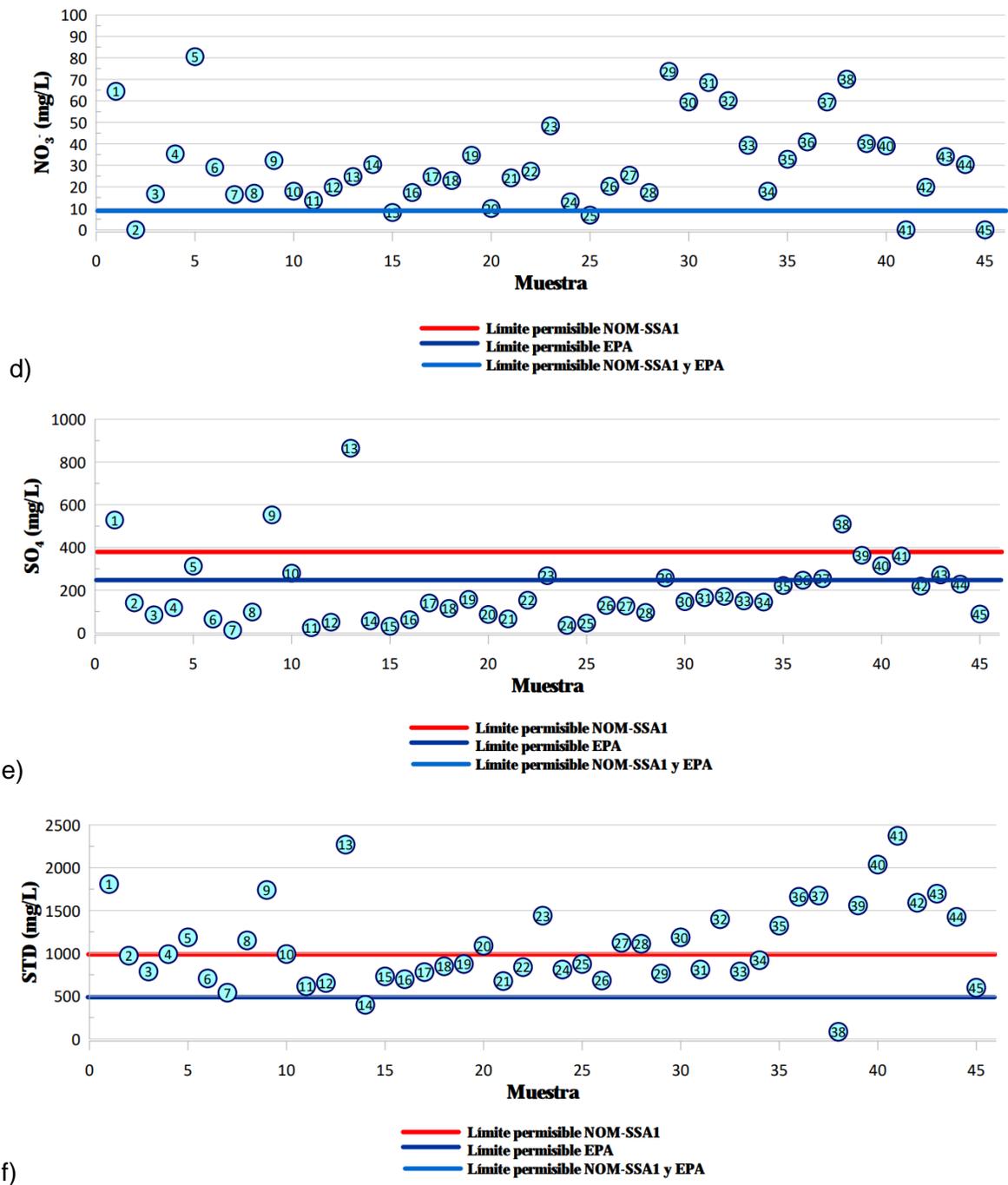


Figura 23. comparativa entre las concentraciones de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos con respecto a la NOM-127-SSA1, 2021 y a la regulación proveída por la EPA (2023).

Tabla 6. Porcentajes de muestras fuera de los límites permisibles establecidos por la NOM-127 (2021) y la EPA (2009)

Parámetro	Muestras con concentraciones por encima de la NOM-SSA1-127	Muestras con concentraciones por encima de la regulación de la EPA (2001)
STD	44%	98%
Na ⁺	38%	
SO ₄ ²⁻	9%	17%
Cl ⁻	35%	35%
NO ₃ ⁻	87%	87%
DUREZA	29%	

La tendencia general, es que las muestras más evolucionadas (35 a 44), localizadas al sureste de la zona de estudio son las que rebasan ambas normas.

La continuación del flujo principal desde la parte noroeste y noreste hasta el sureste se refleja en el incremento de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos. Resalta la muestra 13, que rebasa ambos límites en todas las mediciones, tanto para iones como parámetros fisicoquímicos. Otra tendencia a destacar corresponde a las muestras ubicadas dentro y muy cerca del Distrito de Riego Valsequillo, que también se encuentran por encima de las regulaciones evaluadas.

4.3.2 Cálculo de índices de calidad para consumo humano

4.3.2.1 ICA

Siguiendo la formula tomada de Conesa (1993) y el código desarrollado en Matlab para utilizar la base de datos completa, se obtuvieron los índices de calidad para cada una de las muestras.

El rango de porcentaje de calidad para el ICA varía de 30 a 78 con una media de 60. Siguiendo la clasificación de Conesa (1993) (Tabla 3) para el ICA, se tiene que la mayor parte de las muestras están clasificadas como contaminadas, seguido de una contaminación leve, excesiva y por último fuertemente contaminada.

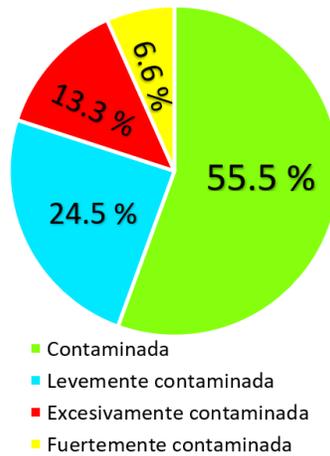


Figura 24. Clasificación de contaminación en la zona de estudio mediante el ICA

4.3.2.2 ICON

Siguiendo la fórmula tomada de Backman et al. (1998), se calcularon los valores para el índice ICON descritos en la tabla para cada una de las muestras. Se encontró que el ICON varía de -4.13 a 9.41 con una media de 1.31. Siguiendo la clasificación para el ICON, se tiene que la mayor parte de las muestras están clasificadas como de baja calidad, seguido de una calidad alta, y en menor proporción de calidad media.

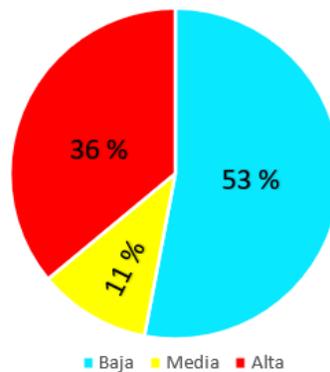


Figura 25. Clasificación de contaminación en la zona de estudio mediante el ICON

CAPÍTULO V DISCUSIÓN

5.1 Caracterización hidrogeológica

En primera instancia, se resalta que la familia predominante refleja la importancia de los procesos de mezcla en la zona de estudio. Lo anterior se puede asociar con la heterogeneidad litológica presente en el área, así como con la llegada de flujos procedentes del noroeste y noreste, convergiendo en las muestras 17, 19, 10, 20, 22, 25 y 24 que son las correspondientes a la familia Na-Ca-HCO₃-Cl (Figura 26).

El hecho de que las cuatro familias predominantes tengan presencia dominante de cationes permite inferir que la disolución de minerales es un aspecto relevante en la zona de estudio, por lo tanto, se determina la importancia del proceso de interacción agua-roca.

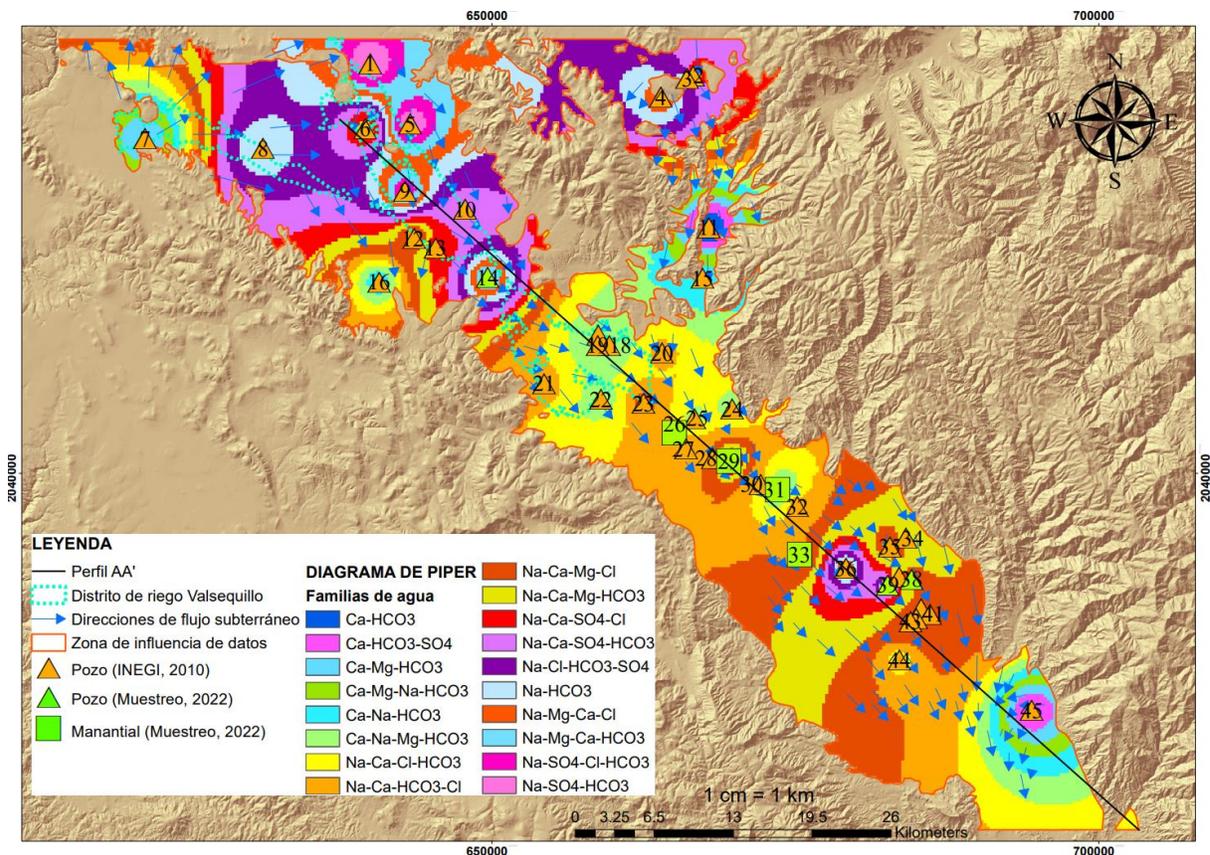


Figura 26. Mapa de familias de agua subterránea en la zona de estudio

El punto 13, presenta concentraciones que quedan fuera de la tendencia seguida por las muestras vecinas. Un análisis integral permitió identificar que esta muestra

en realidad no corresponde a un flujo regional. Las altas concentraciones más bien podrían derivar de la actividad antropogénica, esto se puede asociar con la presencia de una granja porcina a 50 m y la cercanía a otras ubicadas en un radio de 500m. Otro aspecto relevante es que se encuentra dentro del Distrito de Riego Valsequillo.

A pesar de que la tendencia general de evolución coincide con la de los niveles estáticos (INEGI, 2010a, 2010b), existen intercalaciones de muestras con altas concentraciones, que el mapa (Figura 27) realizado a partir de los resultados del diagrama de Mifflin (Figura 18), sugiere clasificar como flujos regionales. Sin embargo, al analizar lo que se encuentra alrededor de los puntos muestreados, se dedujo que este comportamiento debe entenderse más bien como derivado de las actividades antropogénicas correspondientes a la agricultura y granjas avícolas y porcinas cercanas.

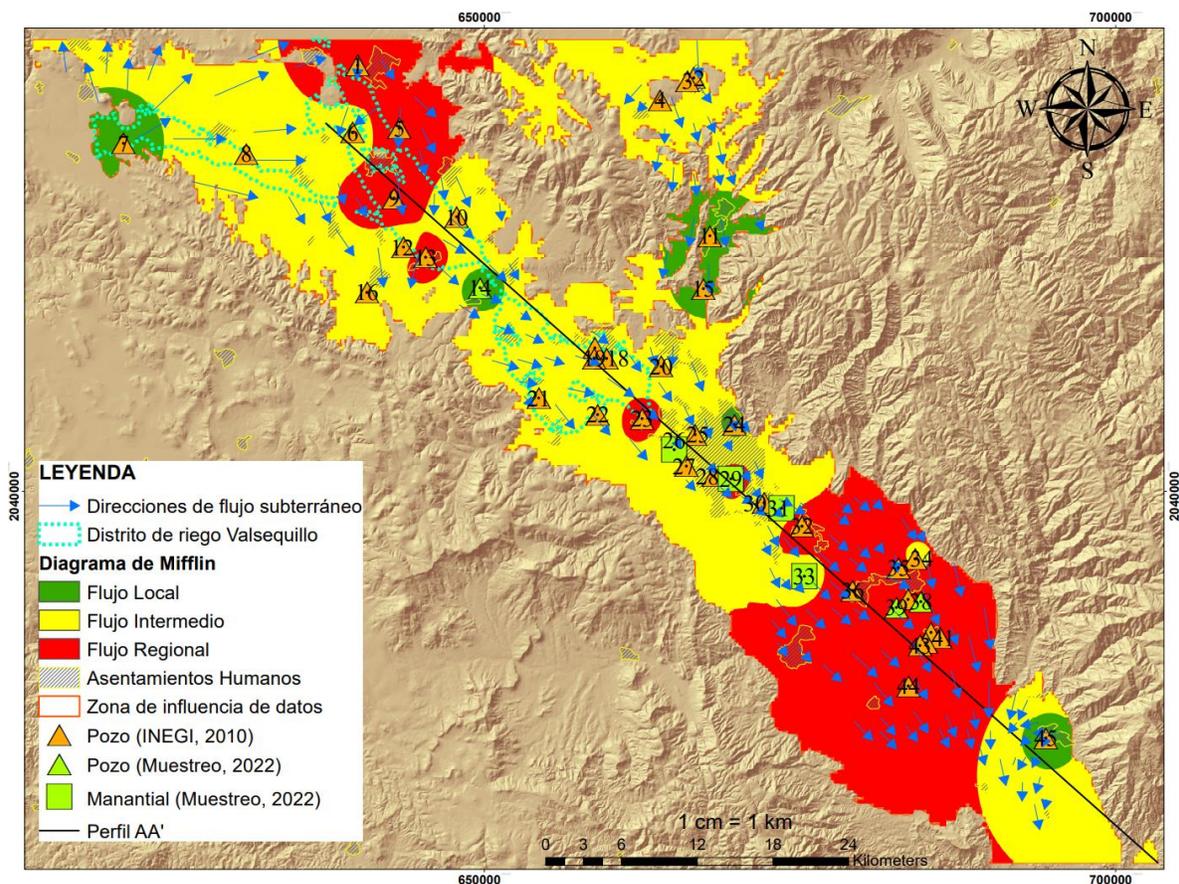


Figura 27. Mapa de sistemas de flujos de aguas subterráneas

La comparación entre las Figuras 28 y 29, permite visualizar la relación entre la litología con las características del proceso de interacción agua-roca. La sectorización marcada en la Figura 28, no corresponde de forma exacta con lo visto en la Figura 29. Existen zonas de transición hacia el norte que marcan dominio de interacción con rocas carbonatadas. Esto podría deberse a que la capa de tobas andesíticas tiene un espesor muy delgado, generando la presencia de áreas en donde el agua en realidad se encuentre interaccionando con la capa inferior que corresponde a la Formación Tehuacán, con alto contenido de rocas carbonatadas. Esta situación también se puede atribuir a las regiones de la parte noreste; sin embargo, en esa zona además destaca el contacto directo con la Formación Maltrata, constituida por lutitas y calizas.

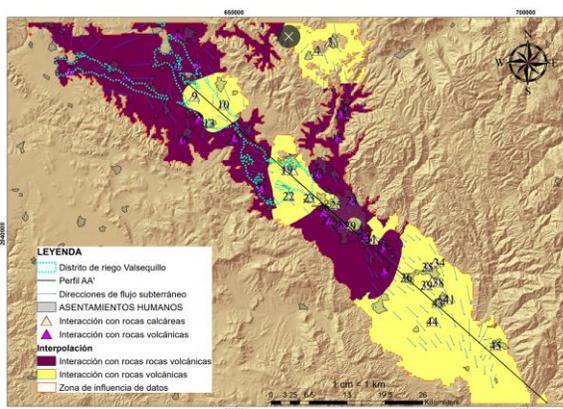


Figura 28. Mapa de diferenciación de interacción con rocas calcáreas y volcánicas en la zona de estudio

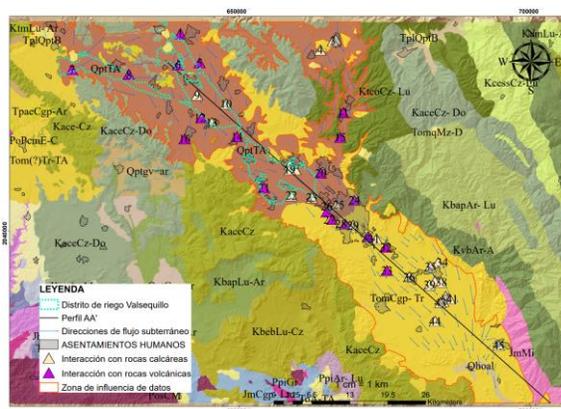


Figura 29. Mapa geológico con muestras clasificadas por interacción con rocas calcáreas y volcánicas en la

La transición de predominio de HCO_3^- a Cl^- , corresponde con lo fundamentado por el diagrama de Mifflin (Figura 18). Además, el dominio de la interacción agua-roca en el área justifica el importante papel de la relación entre la composición del agua subterránea y las características litológicas del acuífero (Kumar et al., 2008). El diagrama mencionado también refiere la interacción entre la química de la roca y la hidrogeoquímica de las aguas que percolan el subsuelo.

En principio, de acuerdo con lo descrito por el diagrama de Gibbs (Figura 19 y Figura 20), la salinidad se presenta muy heterogénea, pero llega a mostrar una diferencia significativa en las muestras 13, 36, 41 y 40, las cuales están ubicadas en el dominio de la evaporación. Sin embargo, considerando lo descrito anteriormente, únicamente las muestras 36, 41 y 40 pueden ser asociadas con la presencia de flujos más evolucionados naturalmente.

Las muestras 13 y 45 claramente no siguen la tendencia natural marcada por los puntos cercanos (Figura 8 y Figura 27). Litológica y estructuralmente no se encuentra un contraste significativo que permita explicar este cambio abrupto. Sin embargo, analizando el contexto de actividades antropogénicas que se desarrollan en y cerca de este punto, se determinó que para la muestra 13 podría existir una importante influencia antropogénica. Por otro lado, en el caso de la muestra 45, las bajas concentraciones, y poca evolución se relacionan con lo somero del pozo, y la cercanía directa a un alto topográfico.

Para el diagrama de Gibbs de radio $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ (Figura 20), se infiere que las muestras 14, 12, 26, 6, 3, 29, 5, 8 y 1 se pueden asociar con el proceso de intercambio iónico debido a que se encuentran fuera del boomerang y a la extensión que alcanzan hacia zonas de valores más altos de $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ a bajas concentraciones de STD. Para el resto de las muestras que siguen una pendiente horizontal con tendencia a cero (antes de seguir una dirección hacia la región de la evaporación), se infiere el proceso de meteorización.

La relación indicada por el diagrama $Na^+ vs Cl^-$ (Figura 21a) permite inferir que existe una fuente importante de iones de sodio que no corresponde a la disolución de halita en el lecho rocoso ni a la precipitación química. Cerling (1989) indica que de ser esta la situación, la tendencia iría muy marcada hacia la línea 1:1. Por lo tanto, el alto contenido de sodio, puede ser consecuencia del proceso de intercambio catiónico de Ca^{2+} por Na^+ o bien de la meteorización de silicatos.

Comparando las gráficas $Na^+ vs Cl^-$ (Figura 21a) y $Na^+ vs Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (Figura 21b), se puede apreciar que en el primer diagrama el predominio del proceso de intercambio iónico directo es mucho mayor, mientras que, en el segundo, se reduce

a únicamente ciertas muestras. Por lo tanto; se prioriza lo indicado en la relación $Na^+ vs Cl^-$ ya que permite apreciar mejor la influencia del proceso de meteorización de silicatos. Las secciones atribuidas al proceso de intercambio iónico en los dos diagramas mencionados presentan coincidencia en las muestras, sin embargo, en la relación $Na^+ vs Ca^{2+}+Mg^{2+}$ (Figura 21b), se suman otros puntos, por lo que es necesario atribuir otro proceso que justifique este desajuste.

Analizando lo obtenido del diagrama $Ca^{2+}+Mg^{2+} vs HCO_3^-+SO_4^{2-}$ (Figura 21c), se resalta que existe una clara tendencia de la mayoría de las muestras hacia la zona de meteorización de silicatos, aunque esta es reducida en comparación con lo establecido en la gráfica $Na^+ vs Cl^-$ (Figura 21a), por esta razón se destaca también el proceso de fuente de precipitación.

Un aspecto destacable es que las muestras que mantienen bajos valores de $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ en la relación $Ca^{2+}+Mg^{2+} vs HCO_3^-+SO_4^{2-}$ (Figura 21c), se encuentran dentro o muy cercanas al Distrito de Riego Valsequillo, por lo que se atribuye una influencia de mayor importancia al proceso de intercambio iónico por encima de la meteorización de silicatos, que se ha documentado como un comportamiento común para este tipo de tendencias.

Al relacionar la geología encontrada en los sitios en donde se ubican las muestras que caen sobre la línea 1:1 (Figura 21c) asociada con el proceso de disolución (Kortatsi, 2006), se observa que:

La muestra 15 se encuentra en tobas andesíticas, que cubren un valle estrecho rodeado por la Formación Maltrata constituida por calizas (Figura 7). Destaca también que se encuentra dentro de una zona urbana (Figura 8). La interpretación mediante el diagrama de Miffilin (Figura 18) indica que corresponde a un flujo de recarga y, de existir procesos de disolución como marca el diagrama $Ca^{2+}+Mg^{2+} vs HCO_3^-+SO_4^{2-}$ (Figura 20c), ésta correspondería a disolución de calizas.

Luego, la muestra 19 se encuentra dentro del Distrito Valsequillo, sobre las tobas volcánicas y junto a una zona urbana (Figura 8).

La muestra 23 se encuentra ubicada muy cerca del distrito de riego, y geológicamente se relaciona con tobas andesíticas (*Figura 8*). Además, resulta relevante, que se encuentra muy próxima a la Formación Tehuacán, esta última constituida tanto por yesos, anhidrita, calcita o dolomita ya que es sumamente heterogénea y por lo tanto es fácil asumir una disolución.

La tendencia general de disolución de carbonatos es hacia el sureste y en parte de la región noroeste del noreste.

Hacia la región central, a pesar del predominio de la Formación Tehuacán, existe un marcado proceso de meteorización de silicatos; sin embargo, también es observada una tendencia hacia la disolución, esto puede relacionarse con la alta heterogeneidad de tal Formación.

En el diagrama Ca^{2+} vs Mg^{2+} (*Figura 21d*), se observa una zona de precipitación de calcita, en donde se incluyen las muestras 39, 14 y 36, esta tendencia puede ser comprobada con un análisis del mapa geológico presentado en esta tesis (*Figura 8*). Las muestras 3 y 4 se encuentran en tobas y están muy cercanas a las formaciones Tehuacán y Maltrata (*Figura 7*), esta última constituida por calizas, por lo que se infiere el proceso de precipitación de $CaCO_3$.

En la relación Ca^{2+} vs Mg^{2+} (*Figura 21d*), la zona entre el eje de las abscisas y la línea 1:2 no resulta atribuida a un proceso específico según los trabajos revisados. Pero comparando tales observaciones con lo obtenido de las gráficas Na^+ vs Cl^- (*Figura 20a*) y Na^+ vs $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (*Figura 21b*), pueden atribuirse procesos de meteorización de silicatos e intercambio iónico principalmente.

Hasta este punto el análisis de los diagramas bivariados ha permitido asumir que el intercambio iónico es un proceso de gran importancia en el área de estudio.

El diagrama $Na^+ + K^+ - Cl^-$ vs $Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}$ (*Figura 21e*), documentado por Kortatsi (2006), para el reconocimiento del intercambio catiónico fue utilizado en la presente tesis para evaluar cómo funciona tal proceso en la zona de estudio, encontrando que, las muestras de la esquina superior no deben confundirse en cuanto a procesos. Estos puntos mantienen los valores más altos de sodio debido

a la alta evolución, mientras que las elevadas concentraciones de calcio son consecuencia de la composición litológica de la zona. Las altas concentraciones de sólidos totales disueltos son comprendidas como resultado del desarrollo de los diversos procesos de interacción que han atravesado, tal asunción ha sido comprobada en el presente mediante el análisis de otros diagramas hidrogeoquímicos.

El diagrama que relaciona el Índice CCR con $Cl^{-}/(Alk+ Cl^{-})$ (Figura 22), puede ser interpretado como un resumen de lo que sucede en cuanto a los procesos que tienen lugar en la zona de estudio, permitiendo su diferenciación concreta. En el cuadrante superior izquierdo se asumen procesos de interacción agua-roca que representan el contacto con rocas carbonatadas y silicatos, producto de un fenómeno de meteorización. La evolución, tiende hacia una estabilización en el valor cero del CCRindex, al que llegan las muestras más evolucionadas, que son coincidentes con las que aparecen en la parte suroeste de la zona de estudio. Además, las muestras 36, 38, 40 y 41 presentan un proceso de evapotranspiración que se justifica, tanto con el nivel de evolución del agua subterránea, como con el clima cálido representativo del suroeste del área estudiada. Otro aspecto relevante es la atribución del proceso de intercambio iónico en el cuadrante inferior izquierdo en donde destaca la coincidencia con las muestras que se encuentran dentro del Distrito de Riego Valsequillo (Figura 8).

5.2 Calidad del agua subterránea para consumo humano

A pesar de que la clasificación propuesta por Conesa (1993) para el ICA (Tabla 3) establece seis rangos, los resultados obtenidos para el área de estudio se concentran únicamente en los cuatro niveles de mayor contaminación. Por otro lado, se encuentra que, de acuerdo con el ICON (Tabla 4), la mayor parte del área de estudio presenta una baja calidad. Ambos aspectos dan una idea general sobre la deficiente calidad del agua subterránea en la zona de estudio.

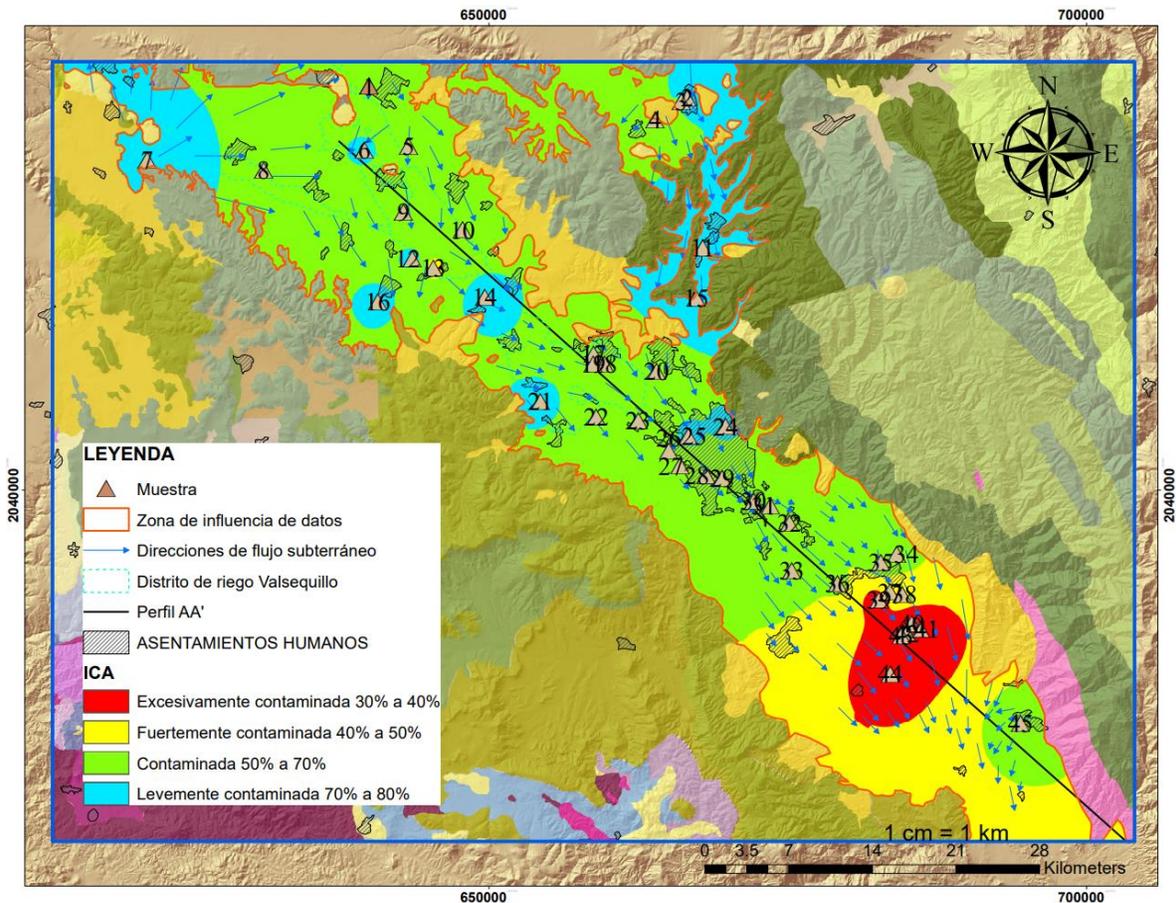


Figura 30. Mapa de ICA

La tendencia general al incremento de la contaminación es hacia el sureste, esta se puede visualizar tanto en el mapa del ICA, como en el del ICON y coincide con la dirección del flujo. Este comportamiento ha permitido que el aumento de las concentraciones de iones mayoritarios y parámetros fisicoquímicos se reúnan en la región mencionada.

Cabe destacar que además de la influencia de la interacción agua-roca y de los procesos hidrogeoquímicos ya mencionados en el apartado de caracterización, la contribución de la actividad antropogénica debe considerarse como un factor de suma importancia en todo momento en el objetivo de entender las causas de la contaminación en una zona de estudio.

Las descargas agrícolas, así como los productos provenientes de granjas avícolas y porcinas, se concentran resultando en una excesiva contaminación que engloba

las muestras 39, 40, 41, 42, 43, 44 de acuerdo con el ICA. Esto es consistente con lo que se ha encontrado en los análisis de coincidencia de dirección de flujo y demuestran la ausencia de barreras que puedan evitar que los contaminantes provenientes de agua arriba continúen su curso. Evaluando estas mismas muestras con el índice ICON, a excepción de las muestras 42 y 44, se encuentra también una zona con el nivel más alto de contaminación.

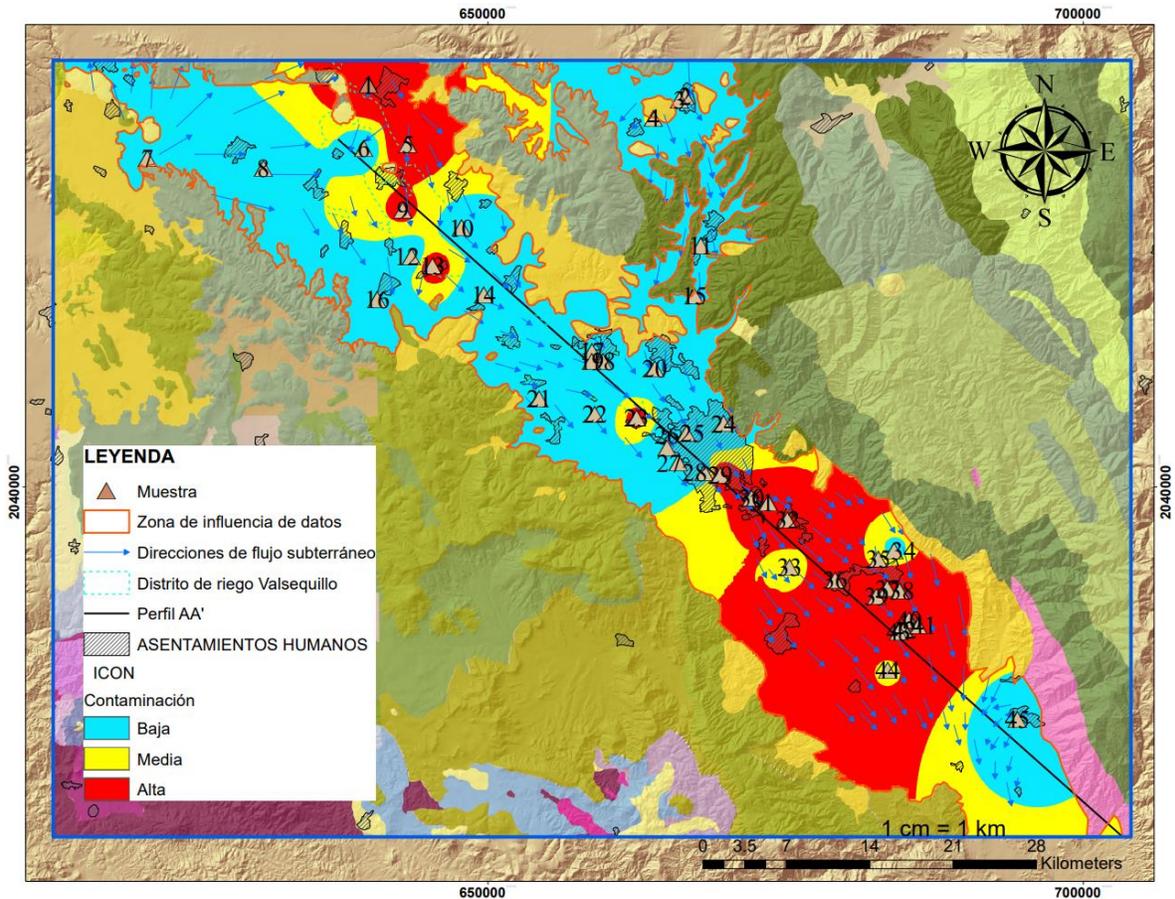


Figura 31. Mapa de ICON

Para ambos índices, la continuación hacia el sur se pierde en la interpolación, debido a la influencia de la muestra 45. Este punto corresponde a un flujo local dados los resultados generales de bajas concentraciones de iones mayoritarios conservativos como los cloruros, así como de parámetros hidrogeoquímicos característicos de flujos evolucionados, como la conductividad eléctrica. Esta muestra no se encuentra influenciada por descargas procedentes de actividades antropogénicas, y mantiene una estrecha tendencia hacia las características del

agua de lluvia. Además de que la dirección del flujo proviene de la Sierra Juárez, evaluada en la presente tesis como impermeable. La colindancia con este alto topográfico influye en que los tiempos de residencia sean muy cortos, lo cual limita el proceso de interacción agua-roca.

Cabe destacar que, a pesar de que la muestra 13, ha resaltado en la presente tesis dadas las altas concentraciones asociadas, no se clasifica como excesivamente contaminada de acuerdo con el ICA. Sin embargo, sigue reflejando un problema importante al ser evaluada como fuertemente contaminada, y que la causa de tal situación sea la acción antrópica. En términos del ICON, presenta el mayor grado de contaminación, de acuerdo con la clasificación de Conesa (1993).

Otra zona importante clasificada como fuertemente contaminada se encuentra hacia el sur del área de estudio, y rodeando el área evaluada como altamente contaminada de acuerdo con el ICA. La interpolación realizada permite inferir este comportamiento, sin embargo, la delimitación exacta no puede ser asumida únicamente por esta técnica matemática. Analizando los alrededores a esta área, se encuentra que la zona ubicada más al sur en realidad debe suponerse con un grado más alto de contaminación. Tanto la influencia del agua de reciente infiltración atribuida por la muestra 45, como la ausencia de datos en tal región son factores determinantes en que la interpolación genere un resultado con un menor grado de contaminación. Sin embargo, para términos del presente estudio, el resultado se acepta como correcto dado que no existe una diferencia importante con respecto al valor más alto de contaminación, y teniendo en cuenta el hecho de que puede considerarse como una zona de mezcla que da un valor intermedio entre dos extremos. Lo mismo sucede con el ICON, los puntos extremos dan una zona de mezcla representada como una contaminación media.

Las zonas menos contaminadas del área de estudio se encuentran distribuidas. Destaca la parte noroeste, en la cual se observan este tipo de regiones fuera y alrededor del distrito de riego, ya que el área del distrito se encuentra más bien en su mayoría con un nivel más alto de contaminación. De ahí la parte del noreste,

consistente con su calidad de flujo local, dadas las características atribuidas de reciente infiltración, representa también una leve contaminación.

Es importante resaltar que se tienen dos fenómenos determinantes en el área de estudio. El primero está representado por la evolución natural que contribuye a una acumulación de altas concentraciones de iones y a que ciertos parámetros sean más altos, advirtiendo que esta zona es resultado de una trayectoria sin barreras hidrogeológicas, que pudieran conllevar a un cambio en la dirección del flujo, preferencialmente determinado por la topografía. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que, en el área de estudio, se tienen zonas urbanas, así como gran abundancia de granjas y tierras de cultivo que también pueden contribuir a esta acumulación. Sin embargo, el alto contenido de NO_3^- , característicos de la contaminación antropogénica, sugieren dar un mayor peso a este último origen antrópico.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

- La caracterización hidrogeoquímica realizada permitió comprobar que la dirección del flujo subterráneo es hacia el sureste, lo cual coincide con la topografía tal y como lo indica el modelo conceptual inicial del Valle de Tehuacán.
- Las tres familias predominantes en la zona de estudio son: Na-Ca-HCO₃-Cl, Na-Ca-Mg-Cl y Ca-Na-Mg-HCO₃. Este tipo de facies representan mezclas de aguas subterráneas, resultado de la interconexión de flujos provenientes del noroeste y noreste que llegan a la zona central del Valle y continúan hacia el sureste.
- El tipo de flujo dominante es intermedio, además se tienen dos zonas de recarga principales representadas por flujo local, una se encuentran al noroeste en un área sin conexión con aguas arriba y otra al noreste en una zona rodeada por altos topográficos de la Formación Maltrata. Hacia el sureste predomina el flujo regional, que se asocia con la dirección de evolución natural.
- La muestra 13 corresponde a un punto anómalo que podría relacionarse con contaminación antropogénica y con un cambio litológico en el que existe interacción con rocas evaporíticas.
- La muestra 45 no sigue una secuencia de evolución natural, dado que se trata de un pozo muy somero y se encuentra ubicado junto a un alto topográfico impermeable (Sierra Juárez).
- Los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la zona de estudio son mezclas, procesos de interacción agua roca, intercambio iónico, intercambio iónico inverso, disolución de carbonatos y meteorización de silicatos.
- Hacia el sureste domina el proceso de evaporación, coincidiendo con la dirección de flujo subterráneo, mayor evolución y aumento de temperatura.
- Las zonas de mayor evolución ubicadas al sureste de la zona de estudio se corresponden con las áreas más contaminadas de acuerdo con los índices ICA e ICON. Esta tendencia es el resultado tanto de la acumulación de sales derivada de un proceso de evolución natural desde aguas arriba, como de la posible adición de residuos provenientes de actividades antropogénicas.

REFERENCIAS

- Al-Barwary, M. R. A., Meshabaz, R. A., Hussein, N. J., & Ali, N. H. (2018). A comparison of water quality between well and spring samples selected from Soran District, northern Erbil Governorate, Kurdistan Region – Iraq. *IOP conference series*, 454, 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/454/1/012062>
- Amrani, S., Hinaje, S., Fartati, M. E., Gharmane, Y., & Yaagoub, D. (2022). Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation in the Timahdite–Almis Guigou area (Middle Atlas, Morocco). *Applied Water Science*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01609-3>
- Appelo, C., & Postma, D. J. (2004). Geochemistry, groundwater and pollution. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>
- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., & Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental geology*, 36(1-2), 66-64. <https://doi.org/10.1007/s002540050320>
- Barceló-Duarte, J.. (1978). Estratigrafía y Petrografía Detallada del Área de Tehuacán-San Juan Raya, Edo. de Puebla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 143 p.
- Barrientos-Reyna, A. F. (1985). *Estudio geológico regional de una porción de la Sierra Mazateca, Valle de Tehuacán y Sierra de Atzingo* (Doctoral dissertation, Tesis Prof., ESIA, Instituto Politécnico Nacional).
- Beraldi-Campesi, H., Cevallos-Ferriz, S. R., Centeno-García, E., Arenas-Abad, C., & Fernández, L. C. M. (2006). Sedimentology and paleoecology of an Eocene–Oligocene alluvial–lacustrine arid system, Southern Mexico. *Sedimentary Geology*, 191(3-4), 227-254. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.03.018>
- Calderón-García, A., (1956), Estratigrafía del Mesozoico y tectónica del Sur de Puebla; Presa de Valsequillo, Sifón de Huexotitlanapa y problemas hidrológicos de Puebla, in XX Congreso Geológico Internacional, Libro Guía, Excursión A-11: México, D. F., International Geological Congress, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 9-27.
- Campa, M. C., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051. <https://doi.org/10.1139/e83-094>
- Campos-Madrigal, E., Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C. C., Silva-Romo, G. (2013). Sedimentología, reconstrucción paleoambiental y significado tectónico de las sucesiones clásticas del Jurásico Medio en el área de Texcalapa, Puebla - Huajuapán de León, Oaxaca: Revisión de las formaciones Ayuquila y Tecomazúchil. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 24-50.
- Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C.C., & Silva-Romo, G. (2009). Sedimentología de la Formación Matzitzi (Paleozoico superior) y significado de sus

componentes volcánicos, región de Los Reyes Metzontla-San Luis Atolotitlán, Estado de Puebla. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 26, 18-36.

Cerling, T. E., Pederson, B.L., & Von Damm, K. L. (1989). Sodium-calcium ion exchange in the weathering of shales: Implications for global weathering budgets. *Geology* GeoScienceWorld. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017)

Chakraborty, B., Roy, S., Bera, A., Adhikary, P. P., Bera, B., Sengupta, D., Bhunia, G. S., & Shit, P. K. (2021). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in the upper catchment of Dwarakeshwar River Basin, West Bengal, India. *Environmental Earth Sciences*, 81(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10002-3>

Charizopoulos, N., Zagana, E., & Psilovikos, A. (2018). Assessment of natural and anthropogenic impacts in groundwater, utilizing multivariate statistical analysis and inverse distance weighted interpolation modeling: the case of a Scopia basin (Central Greece). *Environmental Earth Sciences*, 77(10). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7564-6>

Chebotarev, I. I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering— 1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 8(1-2), 22-48. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)

Chen, J., Gui, H., Li, C., Wang, C., Chen, C., & Jiang, Y. (2022). Hydrochemical Characteristics and Quality Assessment of Shallow Groundwater in Poultry Farming Sites in Suzhou City, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5), 4071-4084. <https://doi.org/10.15244/pjoes/148190>

CONAGUA. (2007) Regiones Hidrológicas Administrativas (Organismos de Cuencas). [Mapa] <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tehuacán (2105), Estado de Puebla. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/puebla/DR_2105.pdf

Conesa, F. (1993). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Conesa+F+%281993%29+Gu%C4%B1%C2%B4a+Metodolo%C2%B4gica+para+la+Evaluacio%C2%B4n+del+Impacto+Ambiental.+Ed.+Mundi+Prensa%2C+276+pp&btnG=

Dávalos-Álvarez, O. G., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S.A., Martínez-Hernández, E., & Ramírez-Arriaga, E. (2007). Estratigrafía cenozoica de la región de Tehuacán y su relación con el sector norte de la falla de Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, ISSN 1026-8774, Vol. 24, N°. 2, 2007, pags. 197-215. 24.

Durov, S.A. (1948) Natural waters and graphic representation of their composition. In *Dokl Akad Nauk SSSR* (Vol. 59, No. 3, pp. 87-90).

Espejo-Bautista, G., Ortega-Gutiérrez, F., Solari, L. A., Maldonado, R., & Valencia-Morales, Y. T. (2021). The Sierra de Juárez Complex: a New Gondwanan

neoproterozoic-early palaeozoic metamorphic terrane in southern Mexico. *International Geology Review*, 64(5), 631-653. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1870172>

EPA. (2009). National Primary Drinking Water Regulations. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulation-table>

Fannakh, A., & Farsang, A. (2022). DRASTIC, GOD, and SI Approaches for Assessing Groundwater Vulnerability to Pollution: A review. *Environmental Sciences Europe*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00646-8>

Fetter, C.W. (1994). Applied Hydrogeology, Third ed. Prentice Hall Publication

Fisher, R. S., & Mullican, W. F., III. (1997). Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 5(2), 4–16. <https://doi.org/10.1007/s100400050102>

Fries, C. Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región central Meridional de México: Boletín del Instituto de Geología 60, 236 p.

Fries, C. Jr. (1966). *Hoja Cuernavaca 14Q-h (8): con resumen de la geología de la hoja Cuernavaca, Estado de Morelos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.

Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, 170(3962), 1088–1090. <http://www.jstor.org/stable/1730827>

He, S., Li, P., Wu, J., Elumalai, V., & Adimalla, N. (2019). Groundwater quality under land use/land cover changes: A temporal study from 2005 to 2015 in Xi'an, northwest China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 26(10), 2771-2797. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1684186>

Hernández-Éstevez, S. (1980). Excursión geológica al borde noroeste de la paleopenínsula de Oaxaca (sureste del Estado de Puebla): México, D.F., Sociedad Geológica Mexicana, V Congreso Geológico Nacional, Libro guía de la excursión, 3-11.

Hernández-Láscares, D. (2000) Contribución al conocimiento de la estratigrafía de la Formación Matzitzi, área Los Reyes Metzontla-Santiago Coatepec, extremo suroriental del estado de Puebla. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Horton, R.K. (1965) An Index Number System for Rating Water Quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37, 300-306.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas [Mapa]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2006). Red hidrografica digital de México escala 1:250 000 edición 1.0 [Mapa]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Conjunto de datos Aguas subterráneas. Zona hidrogeológica. Tehuacán. Escala 1:250 000

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010b). Conjunto de datos Aguas subterráneas. Zona hidrogeológica. Valle de Tecamachalco. Escala 1:250 000

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional [Mapa]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2019). Carta hidrológica aguas subterráneas México Informe técnico Escala 1:1 000 000 Serie II. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825109639.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Climatología [Mapa]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463769361>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022). División política municipal, 1:250000. 2022 [Mapa]. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/mupal/mun22gw

Ishaku, J.M., Ankidawa, B.A., Abbo, A., 2015. Groundwater quality and hydrogeochemistry of Toungo Area, Adamawa State, North Eastern Nigeria. *Am J Min Metall* 3 (3), 63–73.

Juárez-de la Cruz, E. O. (2015). *Caracterización hidrogeoquímica de las salinas y aguas del Valle de Tehuacán, Puebla*. [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio institucional del Colegio de Postgraduados. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2772>

Jude, N. N., Wotany, E. R., Agyingi, C., Ghomsi, K., Maffo, K. G. A., Menti, A. N., & Armel, Z. E. (2023). Hydrogeochemical characterization of groundwater quality, East of Mount Cameroon and West of the Penda Mboko River, suitability for drinking and irrigation use. *Research Square* (Research Square). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2870371/v1>

Katz, B. G. (1989). Influence of mineral weathering reactions on the chemical composition of soil water, springs, and ground water, Catoctin Mountains, Maryland. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360030207>

Keppie, J. D., Dostal, J., & Shellnutt, J. G. (2016). Old and juvenile source of Paleozoic and Mesozoic basaltic magmas in the Acatlán and Ayú complexes,

Southern Mexico: ND Isotopic constraints. *Tectonophysics*.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.026>

Köppen, W. (1900) Versuch Einer Klassifikation der Klimate, Vorzugsweise Nach Ihren Beziehungen Zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, 6, 657-679.

Kortatsi, B. K. (2006). Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana. *Aquatic Geochemistry*, 13(1), 41-74. <https://doi.org/10.1007/s10498-006-9006-4>

Kumar, S. K., Rammohan, V., Sahayam, J. D., & Jeevanandam, M. (2008). Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River Basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1-4), 341-351. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0633-7>

Kumar, S., Logeshkumaran, A., Magesh, N. S., Godson, P. S., & Chandrasekar, N. (2014). Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 5(4), 335-343. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0196-4>

Liebman, H. (1969). *Atlas of water quality methods and practical conditions*. Munich: R. Oldenburg. Melloul.

López-López, E., Sedeño-Díaz, J. E., Mendoza-Martínez, E., Gómez-Ruiz, A., & Martínez-Ramírez, E. (2019). Water quality and macroinvertebrate community in Dryland streams: the case of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (México) facing climate change. *Water*, 11(7), 1376. <https://doi.org/10.3390/w11071376>

Lloyd, J. W., & Heathcote, J. A. (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*. Oxford University Press, New York, NY.

Martinez-Tenorio, E. (2021). Origen de la discordancia entre el Albiano/Cenomaniano y el Paleoceno en el borde oriental autóctono de la Plataforma de Córdoba en la Cuenca de Veracruz. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. Repositorio DSpace. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/29865>

Mendoza-Rosales, C. (2010). *Estratigrafía y facies de las cuencas cretácicas del sur de Puebla y su significado tectónico*: Mexico City. Doctoral dissertation. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mendoza-Rosales, C. C., Silva-Romo, G., Centeno-García, E., Campos-Madrigal, E., & Rodríguez-Otero, M. (2013). La Formación Chivillas en Tehuacán, Puebla, México: definición, análisis de facies y procedencia. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 65(3), 457–480. <http://www.jstor.org/stable/24921241>

Mifflin, M. D. (1968). *Delineation of ground-water flow systems in Nevada* (Doctoral dissertation, University of Nevada, Reno).

Moharir, K., Pande, C., Singh, S., Choudhari, P., Kishan, R., & Jeyakumar, L. (2019). Spatial interpolation approach-based appraisal of groundwater quality of arid regions. *J. Water Supply Res. Technology-Aqua* 68 (6), 431–447. doi:10.2166/aqua.2019.026

Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J. A., Mahlknecht, J., Santacruz-DeLeón, G., Martín-Romero, F., Fuentes Rivas, R., & Mora, A. (2018). Modeling of groundwater processes in a karstic aquifer of Sierra Madre Oriental, Mexico. *Applied Geochemistry: Journal of the International Association of Geochemistry and Cosmochemistry*, 95, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.011>

Morán-Ramírez, Janete, Morales-Arredondo, J. I., Armienta-Hernández, M. A., & Ramos-Leal, J. A. (2020). Quantification of the mixture of hydrothermal and fresh water in tectonic valleys. *Journal of Earth Science*, 31(5), 1007–1015. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1294-x>

Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J. A., Fuentes-Rivas, R. M., Arango-Galván, C., Fonseca-Montes de Oca, R. M.G., Marín-Celestino, A. E., & Sandoval-Montes, I. C. (2022). Hydrogeochemical processes in aquifers of volcano-sedimentary origin using inverse modeling. *Journal of South American Earth Sciences*, 117, 103888. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103888>

Mukherjee, I., & Singh, U. K. (2022). Hydrogeochemical characterizations and quality evaluation of groundwater in the major river basins of a geologically and anthropogenically driven semi-arid tract of India. *Science of The Total Environment*, 805, 150323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150323>

NOM-127 (2021). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021 https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gs.c.tab=0

Nsabimana, A., & Li, P. (2023). Hydrogeochemical characterization and appraisal of groundwater quality for industrial purpose using a novel industrial water quality index (IndWQI) in the Guanzhong Basin, China. *Chemie Der Erde: Beitrage Zur Chemischen Mineralogie, Petrographie Und Geologie*, 83(1), 125922. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125922>

Ortega-Guerrero, B. (1989). Paleomagnetismo y geología de las unidades clásticas mesozoicas del área Totoltepec-Ixcaquixtla, Estados de Puebla y Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, tesis de maestría, 134 p. (inédita).

Ortega-Gutiérrez, F. (1978). Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, ISSN 1026-8774, Vol. 2, Nº. 2, 1978, pags. 112-131. 2.

Owen, D. D., & Cox, M. E. (2015). Hydrochemical evolution within a large alluvial groundwater resource overlying a shallow coal seam gas reservoir. *Science of The Total Environment*, 523, 233-252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.115>

Pérez-Martínez, I., Ramos-Leal, J. A., Cardona-Benavides, A., Morán-Ramírez, J., & Villanueva-Estrada, R. E. (2021). Hydrogeochemical characterization for the identification and quantification of the flows that give rise to groundwater in a tectonic valley. *Environmental Earth Sciences*, 80(23). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10057-2>

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, *Eos Trans. AGU*, 25(6), 914– 928, doi:10.1029/TR025i006p00914.

Rama, F., Busico, G., Arumí, J. L., Kazakis, N., Colombani, N., Marfella, L., Hirata, R., Kruse, E. E., Sweeney, P., & Mastrocicco, M. (2022). Assessment of intrinsic aquifer vulnerability at continental scale through a critical application of the DRASTIC Framework: the case of South America. *Science of The Total Environment*, 823, 153748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153748>

Ramos-Leal, J. A. (1989). Estratigrafía y evolución paleoambiental del área de San Juan Ixcaquixtla, Edo. de Puebla. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura.

Ramos-Leal, J. A., Morán-Ramírez, J., Silva-García, J. T., Fuentes-Rivas, R. M., Cruz-Cárdenas, G., Ochoa-Estrada, S., & Estrada-Godoy, F. (2018). Identification of hydrogeochemical processes in a volcano-sedimentary aquifer of Ciénega de Chapala in Michoacán, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(15). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3760-7>

Rao, N. S., Das, R., & Gugulothu, S. (2022). Understanding the factors contributing to groundwater salinity in the coastal region of Andhra Pradesh, India. *Journal of Contaminant Hydrology*, 250, 104053. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104053>

Rashid, A., Farooqi, A., Gao, X., Zahir, S., Noor, S., & Khattak, J. A. (2020). Geochemical modeling, source apportionment, health risk exposure and control of higher fluoride in groundwater of sub-district Dargai, Pakistan. *Chemosphere*, 243, 125409. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125409>

Rubio-Arias, H., Ortiz-Delgado, R. C., Quintana-Martínez, R. M., Saucedo-Terán, R. A., Ochoa-Rivero, J. M., & Rey-Burciaga, N. I. (2014). Índice de calidad de agua (ICA) en la presa la boquilla en Chihuahua, México. *Ecosistemas y Recursos*

Agropecuarios, 1(2), 139–150.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6121115>

Salcedo-Sánchez, E. R., Esteller, M. V., Hoyos, S. E. G., & Martínez-Morales, M. (2013). Groundwater Optimization Model for Sustainable Management of the Valley of Puebla Aquifer, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 70(1), 337-351.
<https://doi.org/10.1007/s12665-012-2131-z>

Sandoval-Montes, I. (2011). Identificación de los flujos subterráneos que alimentan al acuífero de Tehuacán en el estado de Puebla, México, con base en indicadores hidrogeoquímicos y la temperatura del agua subterránea. *Revista Geográfica*, 149, 131–141. <http://www.jstor.org/stable/23339015>

Sedeño-Díaz, J. E., López-López, E., Rodríguez-Romero, A. J., Leos, K. F., Tiburcio-Martínez, M., & Sánchez-Escobar, O. F. (2022). Using different multivariate approaches to assess water quality of qanats in arid zones of southern central Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(41), 61630-61642.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17597-x>

Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., & Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and Tectonic Evolution of Mexico. En *Special papers* (pp. 1-153). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/spe278-p1>

Serrano-Brañas, C. I., & Centeno-García, E. (2014). Paleoenvironmental interpretation using fossil record: San Juan Raya Formation, Zapotitlán basin, Puebla, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(1), 1-13. Recuperado en 17 de julio de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742014000100001&lng=es&tlng=en.

SGM. (1998). Carta geológico-Minera Acatlán de Osorio E14-B83.

SGM. (2001). Carta geológico-Minera Orizaba E14-6.

SGM. (2006a). Carta geológico-Minera Coatzingo E14-B63.

SGM. (2006b). Carta geológico-Minera Molcaxac E14-B64.

SGM. (2011). Carta geológico-Minera Santiago Miahuatlán E14-B65.

SGM. (2012). Carta geológico-Minera Atzumba E14-B85.

SGM. (2017). Carta geológico-Minera Petlalcingo E14-B84.

SGM. (2018a). Carta geológico-Minera San Juan Ixcaquixtla E14-B74.

SGM. (2018b). Carta geológico-Minera Tehuitzingo E14-B73.

SGM. (2019). Carta geológico-Minera Zongolica E14-B67.

Shepard, D. (1968). A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data. Proceedings of the 1968 ACM National Conference, New York, 27-29 August 1968, 517-524. <http://dx.doi.org/10.1145/800186.810616>

Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C. C., Campos-Madriral, E., Morales-Yáñez, A., De La Torre-González, A., & Nápoles-Valenzuela, J. I. (2018). Recycling of Amazonian detrital zircons in the Mixteco Terrane, Southern Mexico: Paleogeographic implications during Jurassic-Early Cretaceous and Paleogene Times. *Journal of South American Earth Sciences*, 83, 210-226. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.02.011>

Singh, S. K., Srivastava, P. K., & Pandey, A. K. (2013). Fluoride contamination mapping of groundwater in Northern India integrated with geochemical indicators and GIS. *Water Science & Technology: Water Supply*, 13(6), 1513-1523. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.160>

Talavera-Mendoza, O., Ruiz, J., Gehrels, G. E., Meza-Figueroa, D., Vega-Granillo, R., & Campa-Uranga, M. F. (2005). U–PB Geochronology of the Acatlán Complex and implications for the paleozoic paleogeography and tectonic evolution of Southern Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3-4), 682-699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.013>

Toriz, G.J. (1983). Informe geológico de actualización geológica del Prospecto Chapulco-Atzompa. IGPR 237. PEMEX. Original no consultado citado en Alzaga y Pano (1989).

Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>

UTIM. (2019). Hidrología subterránea del acuífero valle de Tehuacán [PowerPoint slides]. Universidad tecnológica de Izúcar de matamoros. <https://docplayer.es/216223665-Hidrologia-subterranea-del-acuifero-valle-de-tehuacan.html>

UNWATER, & UNESCO. (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022. Aguas Subterráneas: Hacer visible el recurso invisible. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa

Wu, C., Fang, C., Wu, X., Zhu, G., & Zhang, Y. (2021). Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater using self-organizing maps in the Hangjinqi Gasfield area, Ordos Basin, NW China. *Geoscience frontiers*, 12(2), 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.012>

Yu, H., Wu, Q., Yifan, Z., Zheng, L., Xu, L., Shouqiang, L., & Wang, D. (2022). Integrated variable weight model and improved DRASTIC model for groundwater

vulnerability assessment in a shallow porous aquifer. *Journal of Hydrology*, 608, 127538. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127538>